INVESTIGACION y CIENCIA

EL PROBLEMA DE LOS FERTILIZANTES QUIMICOS

FIBRAS CUANTICAS DE SILICIO

POSIBILIDADES DE LOS XENOTRASPLANTES

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

TESOROS BUDISTAS DE CHINA EN DUNHUANG



SEPTIEMBRE 1997
800 PTAS.



Septiembre de 1997 Número 252

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Fotografía de G. Aldana, cortesía del Instituto de Conservación Getty

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	Roberto Osti
6	Inst. de Conservación Getty
7	Ru Suichu, *ChinaStock*
8	Inst. de Conservación Getty (*arriba, izquierda*); G. Aldana (*derecha*); L. Conner, Coloreado por L. Grace (*centro*); Roberto Osti (*abajo*)
9	Neville Agnew
10	Neville Agnew (*arriba*); Po-Ming Lin (*abajo*)
12-13	G. Aldana (*arriba, izquierda*); Dusan Stulik (*derecha*); Po-Ming Lin (*inserto*); Instituto de Conservación Getty (*abajo*)
14-15	Alfred T. Kamajian
16	Cortesía de Kevin Hurley (*arriba*); Beppo-Sax Science Data Center
17	Paul Groot, Titus Galama y Jan Van Paradijs (*arriba*); Space Telescope Science Inst.(*abajo*)
18	Max Tegmark (*arriba, izquierda*); NASA (*derecha*); Hye-Sook Park (*abajo*)
19	Beppo-Sax Science Data Center, Roger Ressmeyer y NRAO (*de izquierda. a derecha*)
22-23	Steve Johnson y Lou Fancher
24	Jennifer C. Christiansen
25	D. Erickson, L. Campbell, Corbis-Bettmann, K. Reemtsma y J. D. Hardy (*izquierda*); Wide World Photos, Centro Médico Univ. Loma Linda, Univ. de Pittsburgh, M. Richards y J. Dinsmore (*derecha*)
26	Richard Jones (*cerdo, babuino y corazón*); Jennifer C. Christiansen (*arriba*); Robert P. Lanza (*abajo*)
30-35	Documentos PLS
48-55	J. M. Martínez-Duart, Ricardo Guerrero y José D. Moreno
56-57	B. Christie; M. Ross; J. Goltz; T. Narashima (*centro*) y Biblioteca Británica (*derecha*)
58	Cortesía del Museo de Historia Natural, Londres (*abajo*)
59	Biblioteca Universidad de Delaware (*izquierda*); Bass Photo Company Colection (*derecha*); John A. Underwood (*recuadro*)
60-61	Bibliot. Inst. Smithsoniana; Superstock (*teléfono*); Corbis-Bettmann (*coche*); Museo de la ciudad de Nueva York; The Kobal Collection; Upi/Corbis-Bettmann; Superstock; John Chiasson y NASA
64-65	Jason Hawkes; Eric Freedman; Bryan Christie (*gráfica*)
66	Bryan Christie (*gráfica*); Biografx
67	Dan Guravich
68	Bryan Christie (*arriba*); Adrienne T. Gibson (*abajo*)
69	Upi/Corbis-Bettmann
72-73	DR
75-76	Documentos PLS
78-82	Documentos PLS
84-85	Ian Worpole; Johnny Johnson
87-89	Jennifer C. Christiansen

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

J. M. García de la Mora: *Tesoros budistas de China en Dunhuang*; Mónica Murphy: *Destellos de rayos gamma*; Esteban Santiago: *Xenotrasplantes*; Victoria Laporta: *Abonos nitrogenados*; Luis Bou: *El abuelito Hadamard, Tambores líquidos, Matematización del parecido, Juegos matemáticos* y *De cerca*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*

Ciencia y sociedad: J. M. García de la Mora y Luis Cornudella

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; John Horgan, *Senior Writer*; Corey S. Powell, *Electronic Features Editor*; W. Wayt Gibbs; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; David A. Schneider; Glenn Zorpette; Marguerite Holloway y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION Richard Sasso
PUBLISHER Joachim P. Rosler
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	11.000	20.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

—En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

Un aislante mejor. «Se ha anunciado un nuevo material, constituido por un 6 por ciento de sílice y un 94 por ciento de aire, cuya conductividad térmica es inferior a la del aire en calma, considerado hasta la fecha teóricamente como el aislante térmico más eficaz. La caracterización química del nuevo aislante es de aerogel y su rendimiento es tal que permitirá aumentar las capacidades de frigoríficos y congeladores hasta en un 60 por ciento.»

Desodorante petrolífero. «Hace ya varios decenios que se descubrió que el maloliente petróleo procedente de ciertos campos contenía determinados tipos de derivados del azufre, demostrándose que eran ellos los causantes del hedor que desalentaba a los posibles compradores. Cuando Herman Frasch descubrió la eficacia de los óxidos metálicos para eliminar químicamente ese azufre, no sólo "endulzó" el crudo, destruyendo sus componentes olorosos, sino que además amplió enormemente el mercado merced a nuevas partidas procedentes de Canadá, de Ohio y de otros campos.»

...cien años

A la busca de elementos. «En la Sociedad Británica para el Progreso de la Ciencia, el profesor William Ramsey expuso las razones por las que espera que en su momento se descubra un nuevo elemento que se parecerá, en ciertos aspectos, al helio y al argón. La diferencia entre los pesos atómicos del helio y del argón le lleva a creer que se hallará otro miembro de este grupo para llenar el hueco. Antes de ahora ya se han predicho y realizado descubrimientos de esta naturaleza basándose en la "Ley Periódica" de Mendeleyev. El conferenciante expresó su confianza en la solidez de la ley de Mendeleyev, pese a ciertas discrepancias entre los pesos atómicos teóricos y reales de muchos elementos.» [*Nota de la redacción: Al año siguiente Ramsey y Morris W. Travers aislaron el nuevo elemento, al que llamaron neón.*]

Biología de las trufas. «La forma en que se reproducen las trufas constituye un auténtico rompecabezas para los botánicos. Una reciente comunicación de M. Grimblot a la Academie des Sciences arroja una interesante luz sobre la cuestión. Parece que la difusión de las esporas la efectúan los ratones del bosque. Las investigaciones de M. Grimblot están en la línea de otros experimentos que tratan de comprobar si la difusión de las esporas corre a cargo del ganado. Se cree asimismo que el calor húmedo de los intestinos de esos animales es necesario para el desarrollo de tan apreciados hongos comestibles.»

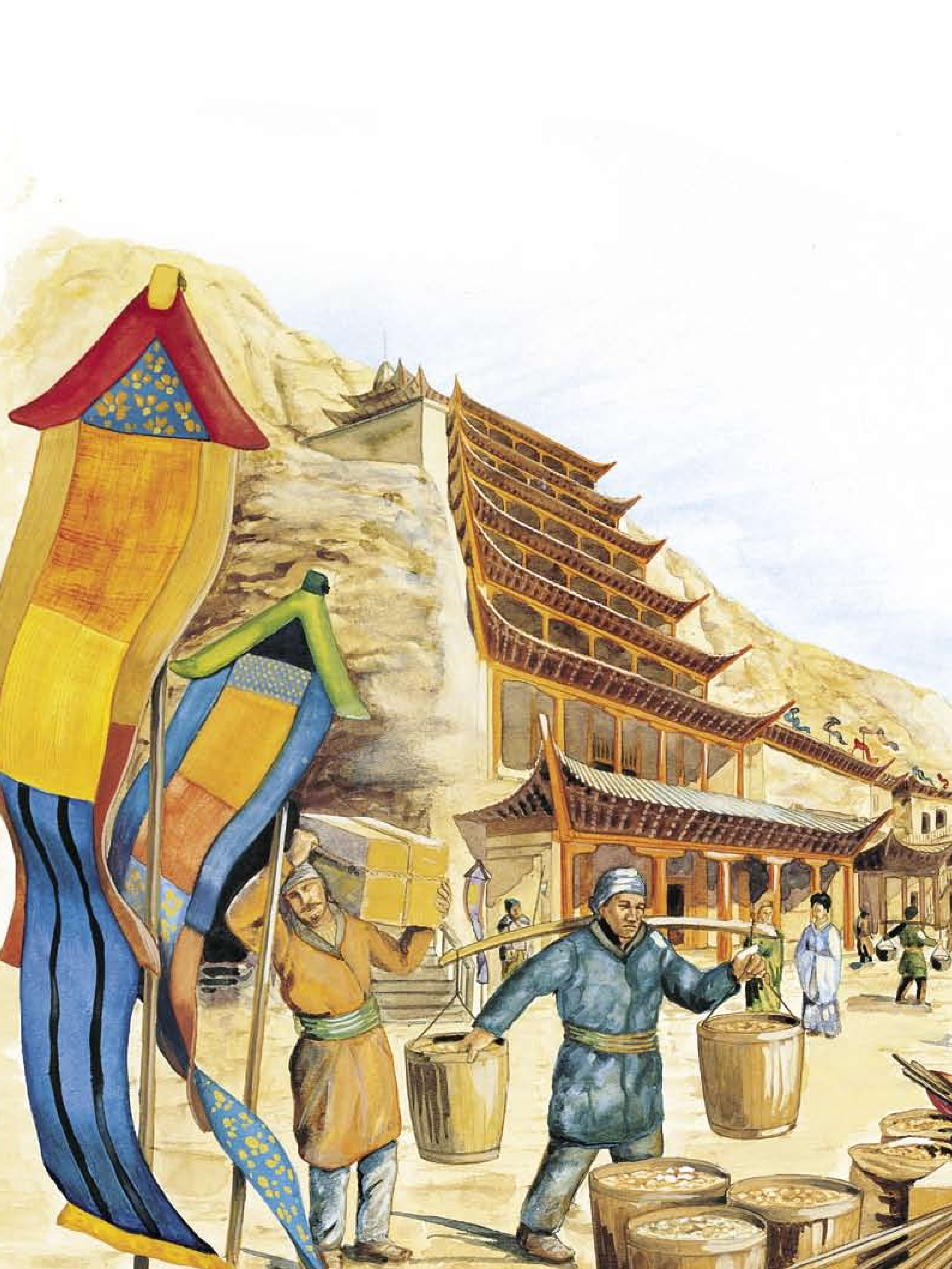
Taxis eléctricos en Londres. «El 19 de agosto pasado comenzaron a ofrecer sus servicios en las calles de Londres los nuevos taxis eléctricos, compitiendo con los carruajes de alquiler. El nuevo vehículo, que nuestro grabado representa, se asemeja mucho a un cupé sin caballo ni varal, apoyado en cuatro ruedas de madera con llantas de caucho. Lleva incorporado un motor de tres caballos, alimentado por la corriente de unas baterías que pesan 635 kilogramos. El vehículo puede recorrer casi sesenta kilómetros por carga y alcanzar velocidades de hasta catorce kilómetros por hora. Se pretende establecer más estaciones de abastecimiento en otros lugares de Londres además de la de Juxon Street, en Lambeth.»

El nuevo taxi eléctrico

...ciento cincuenta años

Electroagricultura. «En su momento se depositaron grandes esperanzas en el cultivo de verduras con electricidad. Recientemente la Sociedad de Horticultura de Londres ha supervisado la realización de precisos experimentos científicos, que han terminado por zanjar la cuestión. Para las experiencias se empleó una potente máquina eléctrica de gran tamaño y las plantas, en macetas, se mantuvieron bajo fuertes cargas cuatro horas al día durante cuatro semanas, sin que pudiera percibirse la más leve influencia, ni a favor ni en contra, sobre el crecimiento de las verduras electrificadas en relación con las que no lo fueron.»

Coca. «En su "Conquista del Perú" afirma Prescott que la coca es un arbusto que alcanza la altura de un hombre. Las hojas, una vez recolectadas, se secan al sol y se mezclan con algo de cal, formando un preparado para mascar, muy parecido a la hoja de betel de Oriente. Con una pequeña provisión de esta coca en su zurrón y un puñado de maíz tostado, el indio peruano de nuestros días pasa sus fatigosas jornadas cotidianas sin cansancio o al menos sin quejas. Sin embargo, esta hierba, tan alabada por los nativos y dotada del dulce atractivo de los sedantes, se dice que está acompañada por todos los nocivos efectos de la borrachera habitual cuando se consume en exceso.»

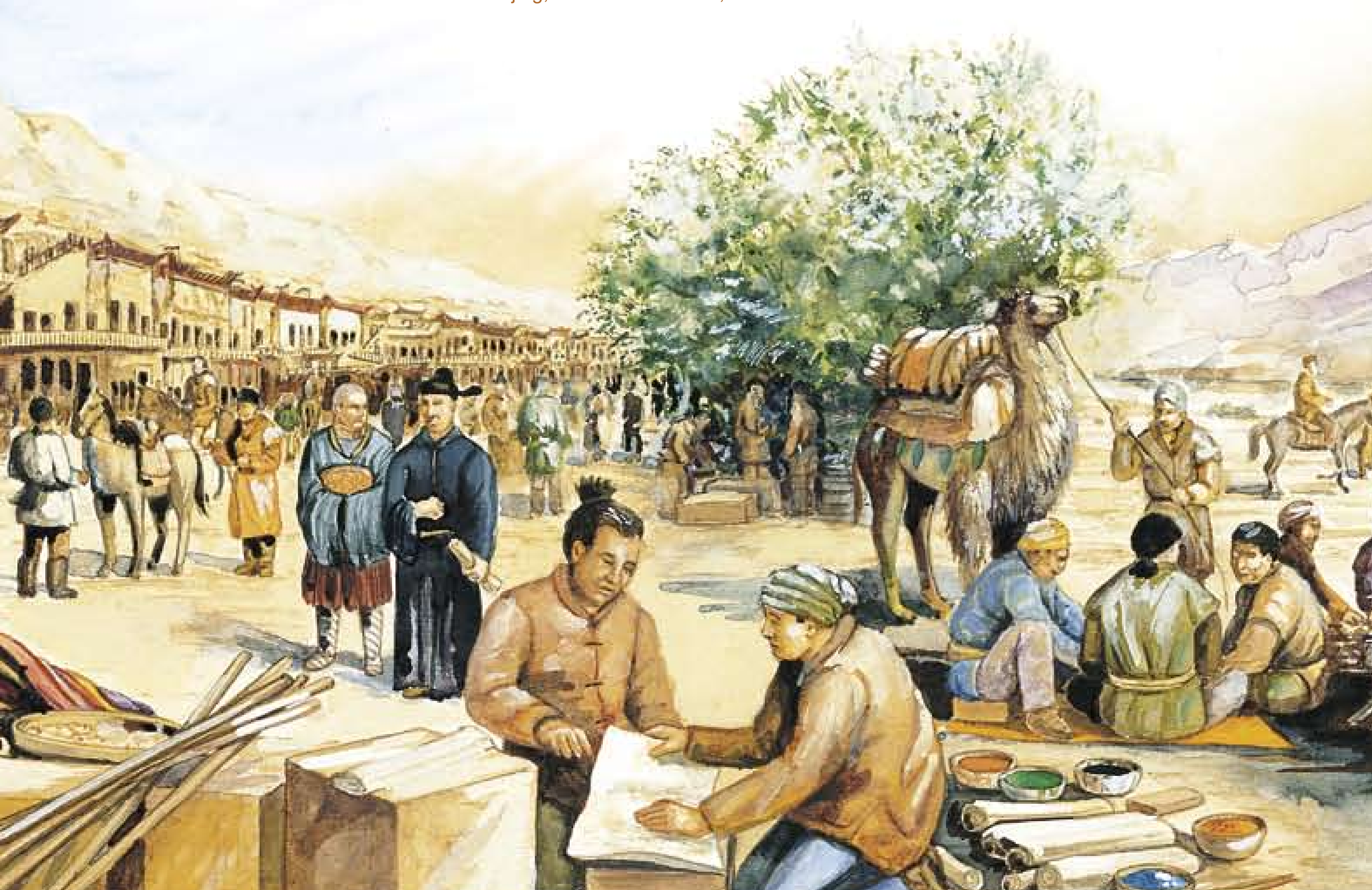


Tesoros budistas de China en Dunhuang

Grutas ornamentadas como templos documentan a lo largo de la antigua Ruta de la Seda las transformaciones culturales y religiosas de un milenio. Los arqueólogos están procurando conservar sus pinturas y estatuas, muy amenazadas hoy de deterioro e irreparable pérdida

Neville Agnew y Fan Jinshi

MOGAO, junto a la ciudad de Dunhuang, fue un frecuentadísimo lugar de parada en la Ruta de la Seda, donde viajeros y mercaderes hacían alto para descansar y practicar sus devociones religiosas. El dibujo representa una reconstrucción imaginaria de cómo sería a mediados de la dinastía Tang (618-907 d.C.), cuando el oasis sirvió de animado refugio a las caravanas que dejaban tras sí los desiertos de alrededor. Como puntos clave de la gran vía comercial, Mogao y Dunhuang fueron sitios de intenso intercambio de culturas, religiones y bienes materiales. Los fieles budistas oraban en las capillas, que acondicionaban esculpiendo las pétreas grutas de la colina y adornándolas con banderas ceremoniales, mientras los viajeros se preparaban para seguir su camino hacia el este, en dirección a Beijing, o hacia el oeste, en dirección al Mediterráneo.



Mil novecientos kilómetros al oeste de Beijing, entre los desiertos de Gobi y de Takla Makán, se halla una de las más importantes puertas culturales del mundo: la ciudad de Dunhuang —nombre que significa “faro brillante”— era el último oasis para los viajeros chinos que iban a occidente siguiendo los ramales norte o sur de la Ruta de la Seda. Ambos caminos bordeaban el terrible desierto de Takla Makán, al extremo del cual se juntaban de nuevo en Kashi (1600 kilómetros al oeste). Para quienes se dirigían hacia el este, las dos fortalezas de Dunhuang —la Puerta de Jade, o Barrera del Yumen, y la Barrera del Yang— representaban el final feliz de la travesía del Takla Makán, jalonada por blancas osamentas de camellos, caballos e infortunados viajeros. Este fortificado puesto fronterizo era como la última prolongación de la Gran Muralla de China.

Del siglo IV al XIV, los 7500 kilómetros de la Ruta de la Seda comunicaron a China con Roma y con todos los países intermedios, como Tíbet, India, Turkestán, Afganistán y la península de Arabia. Dicha ruta —cuyo nombre lo acuñó en el siglo XIX un explorador, el barón Ferdinand von Richthofen— fue bastante más que una vía comercial: fue la primera gran autopista de la información, que se extendía por una cuarta parte de la circunferencia del globo, prácticamente por todo el mundo entonces conocido. De oriente vinieron pasmosas riquezas y las innovaciones técnicas de China: seda, cerámicas, pieles y, más adelante, el papel y la pólvora; de occidente fueron allá el algodón, las especias, las uvas, el vino y el vidrio. Junto con estas mercancías, en agitado intercambio siempre expuesto a mil azares, entre ellos los asaltos de los bandidos, se trasladaban también el arte y las ideas, transformando culturas muy diferentes.

Fue por la Ruta de la Seda como el budismo, que tuvo su origen en la India en el siglo VI a.C., llegó hasta China. El gran arraigo que logró esta religión salta a la vista en los rocosos templos próximos a la ciudad de Dunhuang. Hacia el 360 d.C. los peregrinos budistas que pasaban por allí empezaron a esculpir las grutas de una larga colina que se alza a 25 kilómetros al sudeste de la ciudad. En aquellas cavidades de blanda piedra arenisca y de conglomerado rocoso construyeron santuarios, alojamientos y espacios para las obras del culto y del arte; allí hicieron también ofrendas y rezaron pidiendo que su viaje fuese feliz. Durante los diez siglos siguientes, los monjes labraron en la roca centenares de capillas, acribillando de oquedades la superficie del cantil.

Quedan hoy como medio millar de tales grutas, unas dos mil estatuas de arcilla del Buda y 50.000 metros cuadrados de pinturas murales. Estas obras de arte reflejan los cambios acaecidos en diez períodos y dinastías, entre ellas la Tang (618-907 d. J.C.) que, en su época media, marcó el pleno despliegue del arte y la cultura chinas. Los murales de la alta Tang documentan la vida diaria de muchas gentes de todas las clases sociales que pasaron por Dunhuang o vivieron allí; los de períodos más recientes describen un budismo un tanto austero. Las pinturas registran también artesanías, prácticas manufactureras, formas de vestir, leyendas y sutras



BUDISTAS ORANTES que forman parte de la ornamentación de la Gruta 328. Estas estatuas, de la época alta de Tang, están cubiertas del fino polvo que transporta el viento desde las dunas Mingsha, que oscurece las esculturas y las pinturas murales. Los trabajos de conservación actuales tratan de evitar su deterioro.

(oraciones sagradas). Y muestran la transformación del budismo indio en su modalidad china: a la iconografía hindú se le van incorporando gradualmente mitos y patrones chinos, hasta que emerge un arte budista puramente chino. Estas grutas de Mogao, como se las llama, representan la mayor colección del arte mural budista en China y son una importantísima base de datos sobre la vida en la antigua China y a lo largo de la Ruta de la Seda.

La Ruta de la Seda se cerró durante el siglo XV, al secarse por completo los oasis del Takla Makán, cuando dejaron de refrescarlos los torrentes de los glaciares de los Montes Qilian, por entonces en receso, y a medida que los invasores musulmanes se esparcieron por la región convirtiéndola en gran parte al Islam. El que mucho del legado budista de Dunhuang permaneciera intacto se debió a su situación. El aislamiento físico de la ciudad supuso más de una vez su salvación. Durante las dos épocas en que los budistas fueron perseguidos por los emperadores chinos —en 446, por el emperador Wu, y en 845, por el emperador Wuzong— Dunhuang resultó demasiado alejada del centro del poder como para que la persecución la afectase. Y lo mismo pasó durante la "Revolución cultural" de finales de los años sesenta. (Aunque los tibetanos conquistaron la ciudad dos veces, en el año 781 y a comienzos del siglo XVI, reverenciaron el lugar y practicaron el culto en él. Su influencia estilística puede advertirse en algunas de las grutas.)

Pero, a finales del siglo XIX y principios del nuestro, "demonios extranjeros" en forma de arqueólogos iniciaron el descubrimiento y el traslado sistemáticos de la herencia cultural de la Ruta de la Seda. Estos sujetos emprendieron frenéticas carreras para reunir tantas obras de arte cuantas pudiesen transportar. Entre los más renombrados se cuentan el explorador sueco Sven Hedin, el parisiense Paul Pelliot, Langdon Warner, de la Universidad de Harvard, y Aurel Stein, un coleccionista británico nacido en Hungría. Stein entró en escena en 1907. Al parecer se enteró de la existencia del yacimiento por oír hablar de él a los primeros oc-

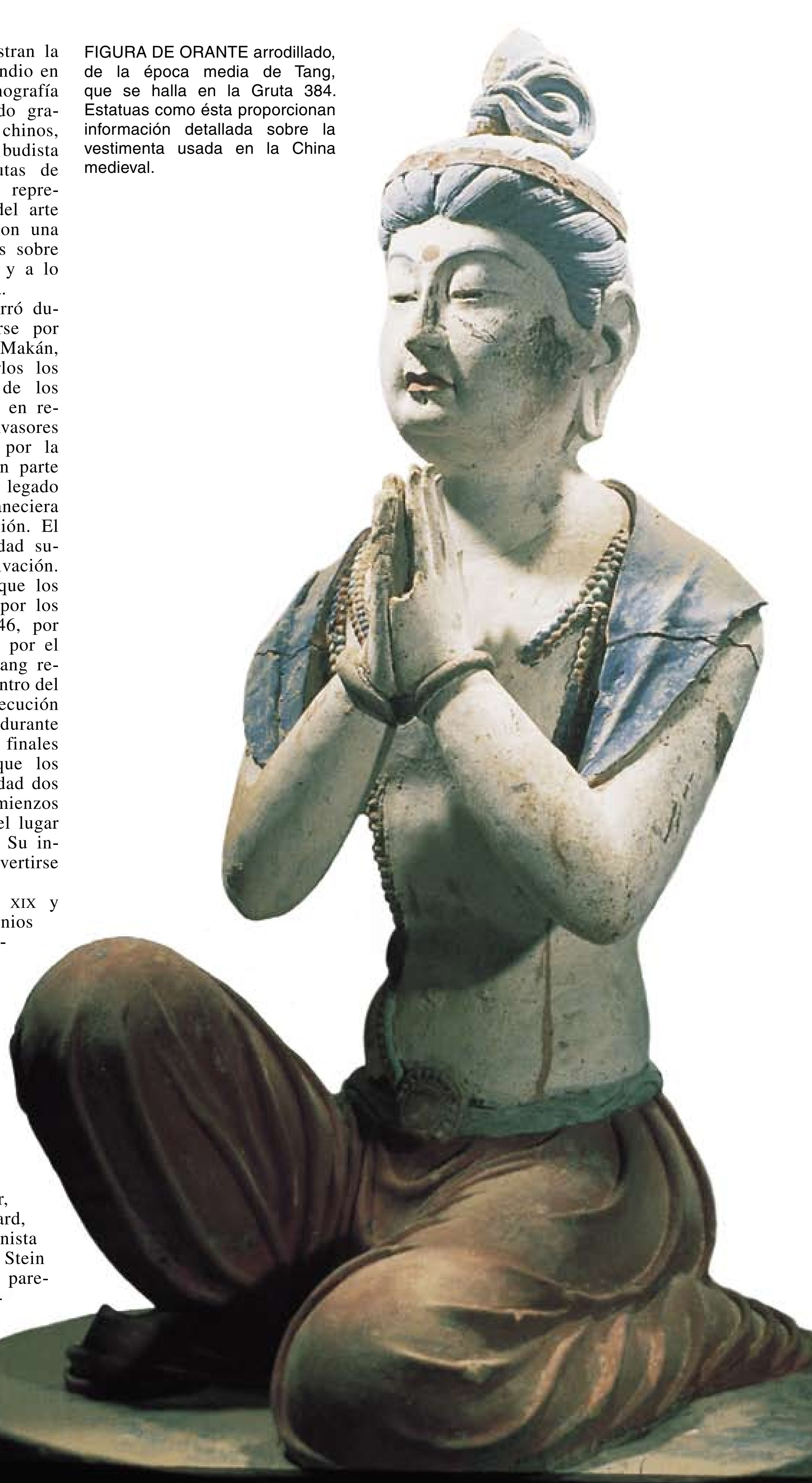
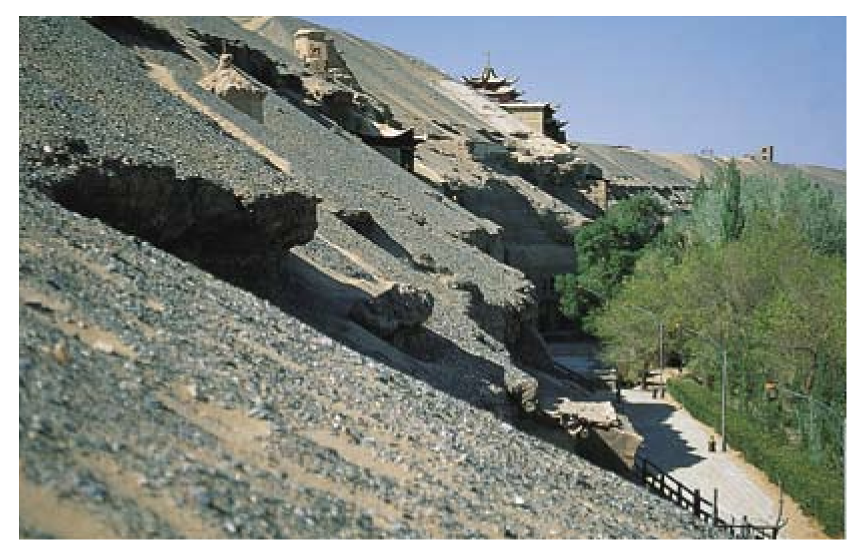
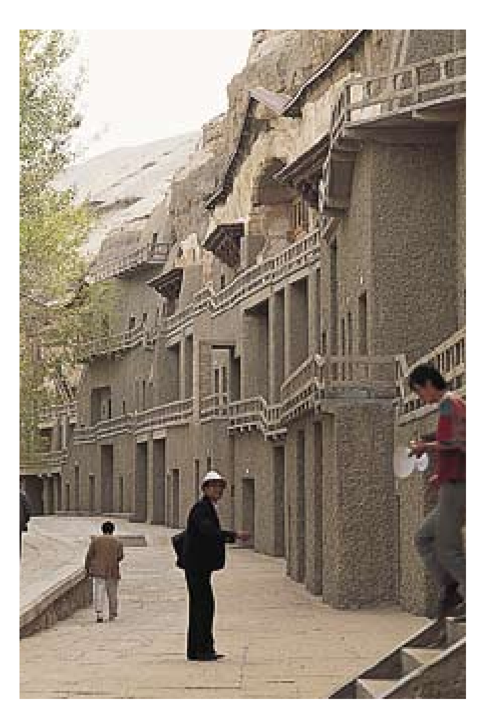


FIGURA DE ORANTE arrodillado, de la época media de Tang, que se halla en la Gruta 384. Estatuas como ésta proporcionan información detallada sobre la vestimenta usada en la China medieval.





LA INVASORA ARENA, deslizándose sobre la colina, amenaza con soterrar las Grutas de Mogao (*arriba*). La fachada de cemento armado (*derecha*), construida en los años sesenta, refuerza algunas de las grutas que han sido erosionadas por el viento y resquebrajadas por los terremotos. Según puede verse en este mapa de la Ruta de la Seda (*abajo*), Dunhuang estaba en los confines mismos de China, en el punto en que se unían los dos ramales de la red comercial tras haber rodeado el terrible desierto de Takla Makán.



LAS DIVINIDADES CELESTES, llamadas *apsarasas*, de esta pintura del techo de una gruta datan de la época de la dinastía Wei occidental (535-542 d.C.).

UN ENTORNO DESERTICO se extiende en todas direcciones alrededor del río Daquan, que provee de agua a Mogao. En la lejanía pueden verse las dunas Mingsha; delante de ellas, próximos al río, los árboles y el frontis de la colina acribillado de cuevas.

EL GRAN MONASTERIO del Monte Wutai, en la provincia de Xanxi, está representado en esta pintura mural del período de las Cinco Dinastías (907-960 d. J.C.), que se encuentra en la Gruta 61. Hay en Mogao 50.000 metros cuadrados de pinturas murales.

cidentales conocidos que lo visitaron, su compatriota húngaro el conde Béla Szechenyi y sus dos acompañantes, que lograron llegar allí en 1878.

Stein es de quien más reniegan hoy los especialistas chinos, acusándole de haberse llevado los 7000 antiguos textos y pinturas budistas que actualmente se almacenan en el Museo Británico, entre ellos el más antiguo libro conocido, una versión de la Sutra Diamante, del 868 d.C., estampada con molde. Estos manuscritos se extrajeron de la Gruta 17, una biblioteca que quedó sellada allá por el año 1000 d.C. y sólo a comienzos de nuestro siglo la redescubrió Wang Yuanlu, un sacerdote taoísta residente en el lugar. Wang fue víctima de la persuasión de Stein y luego de la de Pelliot, quienes lograron que les vendiese secretamente los manuscritos por una mísera cantidad que él emplearía para "restaurar" los templos tallados en la roca. (Entre otros textos menos importantes que también fueron trasladados se incluye un modelo de las disculpas que un invitado que se emborrachó debe enviar a su anfitrión de la noche precedente, junto con la adecuada respuesta de éste.)

Para cuando China se cerró por fin a los arqueólogos extranjeros, hacia mediados de los años veinte de este siglo, los exploradores europeos habían trasladado no sólo muchos millares de textos sino también muchas estatuas y hasta algunas de las pinturas murales. Estas obras de arte se conservan ahora en importantes



ESTE HUNDIMIENTO DE LA TECHUMBRE de la Gruta 460 es una muestra de lo débiles que son las piedras areniscas y los conglomerados rocosos de las grutas, adelgazados además por la erosión a lo largo del tiempo.



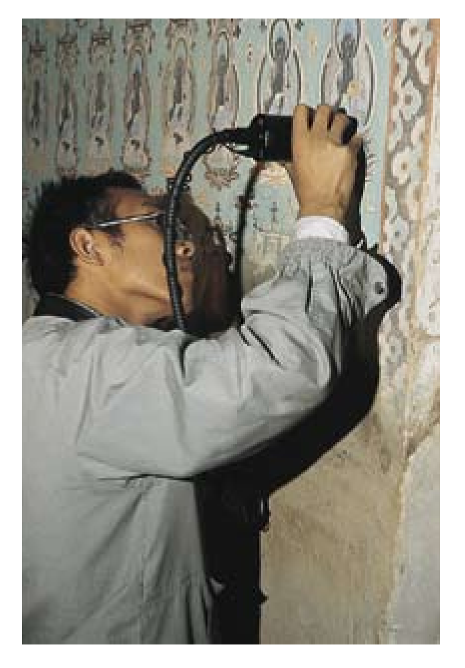


LA OMNIPRESENTE ARENA había de ser barrida y quitada continuamente (*arriba*) hasta que se construyeron cinco kilómetros de vallas (*derecha*) para contener la invasión que amenazaba con soterrar Mogao. Para estabilizar más aún las movedizas arenas, se plantó una vegetación adaptada al desierto —que incluye *Tamarix chinensis*, *Haloxylon ammodendron*, *Calligonum arborescens* y *Hedysarum scoparium*— (*abajo*).

instituciones de Europa, la India, el Japón y los EE.UU.

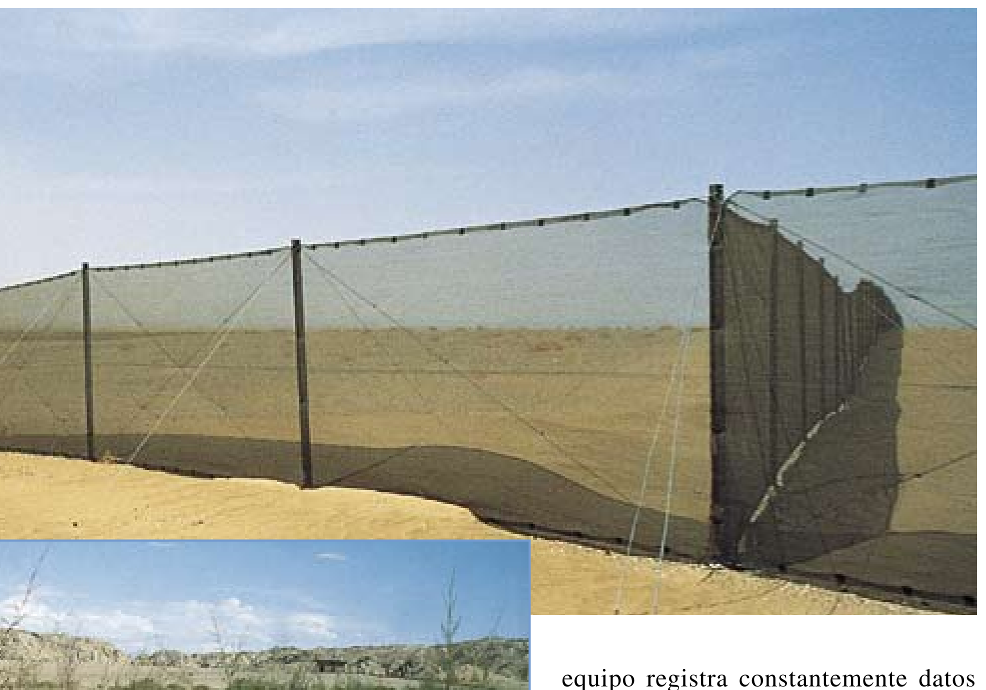
Actualmente los peligros que amagan sobre las Grutas de Mogao son de distinta naturaleza, originándose en su entorno inmediato. A lo largo de los años, los vientos no han cesado de erosionar la colina y las arenas se han precipitado en cascada por su superficie, tapando las entradas de las grutas, volviéndolas a rellenar en parte y recubriendo de un fino polvo oscurecedor las esculturas y las pinturas murales. Donde la humedad de la lluvia y la nieve se ha infiltrado por grietas y agujeros, las pinturas se han echado a perder y la capa de yeso en que fueron pintadas se ha separado de la superficie pétrea. La débil textura de la piedra arenisca ha sido muy resquebrajada por los seísmos, el más reciente de ellos en 1933, y grutas enteras se hundieron por esta causa.

Los visitantes también han hecho su parte. En otros tiempos los transeúntes solían encender fuegos en las grutas, con lo que las pinturas se fueron cubriendo de hollín. El continuo desfile de turistas de los tiempos recientes ha introducido en ellas una humedad que pone en peligro los evanescentes pigmentos y erosiona las baldosas del suelo, que ya tienen un milenio a sus espaldas. Mogao se abrió al público en 1980. Gran número de vuelos llegan al ampliado aeropuerto de Dunhuang, lo que ha supuesto un rápido aumento del turismo en la zona. Al multiplicarse los hoteles nuevos, la antigua población que era Dunhuang se ha transformado en una ciudad moderna.





ENTRE LOS TRABAJOS DE CONSERVACION se cuenta el análisis de las pinturas para ver si sus pigmentos se van debilitando o han cambiado de tono, a veces hasta del blanco al negro (*izquierda*). Se hace también seguimiento del calor, de la humedad y de otros parámetros atmosféricos en torno a la colina (*derecha*). Los datos sobre cambios en el ambiente interior de las grutas sirven para decidir el número y la duración de las visitas permitidas.



NEVILLE AGNEW y FAN JINSHI colaboran como conservadores de las Grutas de Mogao, en Dunhuang. Agnew es director asociado de programas en el Getty Conservation Institute de Los Angeles, donde ha permanecido desde 1988, y es doctor en química. Fan es subdirectora de la Academia de Dunhuang, en la que trabaja desde 1963, y autora de numerosos trabajos sobre muchos aspectos de la historia, el arte y la arqueología de las Grutas de Mogao.

El Getty Conservation Institute de Los Angeles ha colaborado desde 1988 con la Academia de Dunhuang y con la Oficina Estatal de Restos Culturales de China en la preservación del famoso yacimiento, que en 1987 fue designado por la UNESCO como Patrimonio Cultural de la Humanidad. Científicos y conservadores de la Academia y del Getty, ayudados por miembros de otros organismos de investigación chinos, han construido 5 kilómetros de vallas de protección contra el viento. Estas barreras, hechas de materiales sintéticos y de plantas adaptadas al desierto, se alzan por encima de las grutas para reducir la cantidad de arena que el viento haga deslizarse por la superficie de la colina. Antes había que sacar de ellas 2000 metros cúbicos de arena anuales. Las vallas han reducido este volumen en un 60 %; en las puertas de las grutas se han puesto juntas y filtros de polvo para protegerlas de la arena que aún pueda llegarles. Se está tratando de actuar contra las grietas y fisuras, sobre todo las más grandes, que horadan algunos techos, estudiando cómo sujetarlas con abrazaderas y estabilizarlas.

Para analizar las condiciones ambientales y sus repercusiones sobre el yacimiento, se ha instalado frente a la colina una estación meteorológica que funciona con energía solar. El equipo registra constantemente datos tales como la dirección y la velocidad del viento, la radiación solar, la humedad y las precipitaciones. Varias subestaciones situadas en determinadas cuevas registran la humedad relativa, el dióxido de carbono y la temperatura, así como el número de visitantes. Las lecturas sobre el microclima interno se comparan con los datos de las cuevas que están cerradas al público y con los datos del exterior. Toda esta información se utiliza para desarrollar planes de actuación de cara al turismo.

A pesar de la vigilancia continua de las grutas, se hizo evidente que había que limitar el desfile de visitantes, sobre todo en las más populares, las que contienen las pinturas de las conocidas parábolas de la vida del Buda. De ahí que la Academia de Dunhuang construyese cerca un gran museo y una galería de exposiciones en la que están reproducidas unas diez grutas. Como estos facsímiles de tamaño natural están bien iluminados, a diferencia de las grutas auténticas, los visitantes pueden permanecer allí más tiempo que el permitido en éstas.

Como ocurre en muchas otras áreas científicas, la arqueología ha experimentado en China una especie de resurgimiento durante los últimos decenios; en algunos casos han contribuido a ello los esfuerzos conjuntos de equipos de arqueólogos chinos y extranjeros, mas, en su mayor parte, las excavaciones han sido realizadas con recursos científicos y profesionales exclusivamente chinos. Entre los más destacados descubrimientos recientes se incluyen el de la tumba del primer emperador Qinshihuang —con miles de soldados y caballos de terracota— en Xi'an, en 1974; las momias caucasianas de 4000 años de antigüedad encontradas en la zona sur del desierto de Takla Makán; y la tumba del siglo XIII a. J.C. excavada en la provincia de Jiangxi, donde se hallaron vasijas de cerámica y de bronce, campanas y armas adornadas con una iconografía nunca vista anteriormente.

No es posible exagerar la importancia de salvar Mogao y otros yacimientos. Ni siquiera lo apartado y remoto de un emplazamiento como el de las grutas de Mogao garantiza su conservación. Que el Instituto Getty esté colaborando con la Academia de Dunhuang representa un novedoso avance en la conservación del patrimonio cultural de China. Se deberán seguir buscando maneras de proteger estos legados culturales para que los peregrinos de hoy día, viajando por rutas seguramente menos difíciles que las que rodean el siempre mortífero Takla Makán, puedan conocer la historia del mundo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FOREING DEVILS ON THE SILK ROAD: THE SEARCH FOR THE LOST CITIES AND TREASURES OF CHINESE CENTRAL ASIA. Peter Hopkirk. University of Massachusetts Press, 1980.

DUNHUANG, CAVES OF THE SINGING SANDS: BUDDHIST ART FROM THE SILK ROAD. Roderick Whitfield. Fotografía por Seigo Otsuka. Textile and Art Publications, Londres, 1995.

CONSERVATION OF ANCIENT SITES ON THE SILK ROAD. Proceedings of an International Conference on the Conservation of Grotto Sites: Mogao Grottoes, Dunhuang, the People's Republic of China. Dirigido por Neville Agnew. Getty Conservation Institute, Los Angeles, 1997.

Destellos de rayos gamma

Nuevas observaciones aclaran los destellos más potentes del universo

Gerald J. Fishman y Dieter H. Hartmann

Intensos destellos de rayos gamma iluminan nuestro cielo unas tres veces al día. Son invisibles al ojo humano, pero los instrumentos astronómicos los captan. Es probable que las fuentes de esta intensa radiación emitan más energía en pocos segundos o en minutos de la que podrá emitir el Sol en toda su larga vida de diez mil millones de años. Se lleva más de treinta años tratando de determinar el lugar donde se originen estas explosiones y cómo pueda llegar a acumularse allí energía tan inaudita. El fenómeno se ha resistido al análisis científico hasta hace muy poco, pues los destellos provienen de direcciones aleatorias del cielo y desaparecen sin dejar rastro.

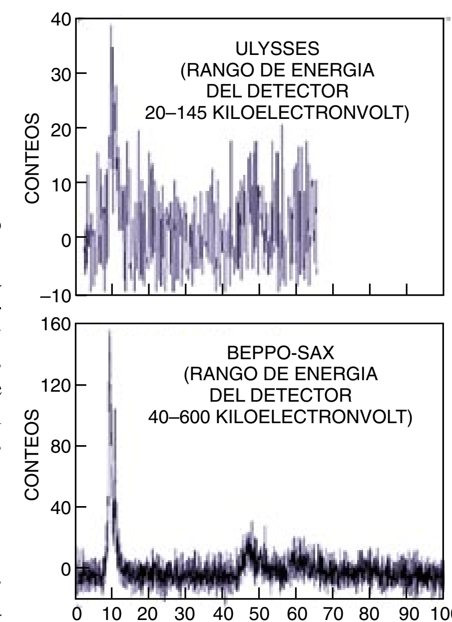
Sin embargo el 28 de febrero de este año sí hubo suerte. Una de estas explosiones alcanzó de lleno al satélite italo-holandés *Beppo-SAX* durante aproximadamente 80 segundos. El monitor de rayos gamma instalado en el satélite localizó el lugar exacto donde se produjo el fulgor —etiquetado prosaicamente como GRB 970228—, situado a pocos minutos de arco de la constelación de Orión y a medio camino entre las estrellas alpha Tauri y gamma Orionis. Ocho horas más tarde los operadores giraron el satélite para observar la misma zona con un telescopio de rayos X. Encontraron una fuente de rayos X (radiación de frecuencia algo menor que los rayos gamma) que se desvanecía rápidamente y fijaron su posición con un margen de error de un minuto de arco.

Era la primera vez que se había logrado establecer con tanta rapidez y precisión el punto exacto de un destello, permitiendo que los potentes telescopios ópticos, cuyo campo de visión es estrecho, de pocos minutos de arco, pudiesen iniciar la búsqueda. Astrónomos de las Islas Canarias, integrados en un equipo internacional liderado por Jan van Paradijs, de las Universidades de Amsterdam y Alabama (Huntsville), conocieron la noticia del descubrimiento a través del correo electrónico. Habían estado tras la pista de otros destellos con ayuda del telescopio William Herschel, de 4,2 metros de diámetro, y pudieron tomar imágenes de la zona tan sólo 21 horas después de la aparición de GRB 970228. Ocho días más tarde volvieron a observar la misma zona y se encontraron con que había desaparecido un punto de luz claramente visible en la fotografía anterior.

Y todavía hubo más. El telescopio de La Silla, Chile, se detuvo en las mismas coordenadas el 13 de marzo y pudo detectar una incandescencia difusa y poco uniforme. El telescopio espacial Hubble determinó luego, gracias a su resolución mucho mayor, que se trataba de un punto luminoso, tras el cual había un objeto alargado que lo rodeaba. Muchos de nosotros creemos que este objeto del fondo es una galaxia, pero su verdadera identidad sigue

1. UN DESTELLO DE RADIACION distante llega a la Tierra y a los detectores del satélite *Beppo-SAX*. Pese a su increíble intensidad, la mayor parte de la radiación no logra penetrar la atmósfera. Los telescopios que apuntaban hacia un reciente destello de rayos gamma, GRB 970228, encontraron, sin embargo, un resplandor óptico que duró semanas.

2. PERFIL TEMPORAL de GRB 970228 registrado por la nave espacial *Ulysses* (*arriba*) y por *Beppo-SAX* (*abajo*); se percibe un destello breve y luminoso de rayos gamma.



siendo una incógnita en el momento de escribir este artículo.

Si efectivamente se tratase de una galaxia —tal como vaticinan las teorías actuales—, tendría que estar muy lejos, cerca de los confines exteriores del universo observable, caso en el que los destellos de rayos gamma serían los mensajeros de las explosiones más potentes de todo el universo.

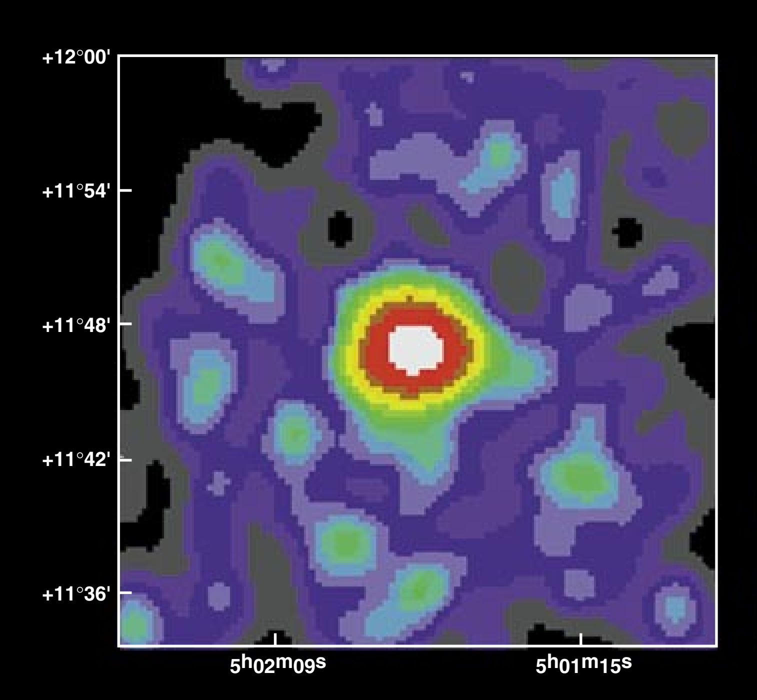
Expectativas frustradas

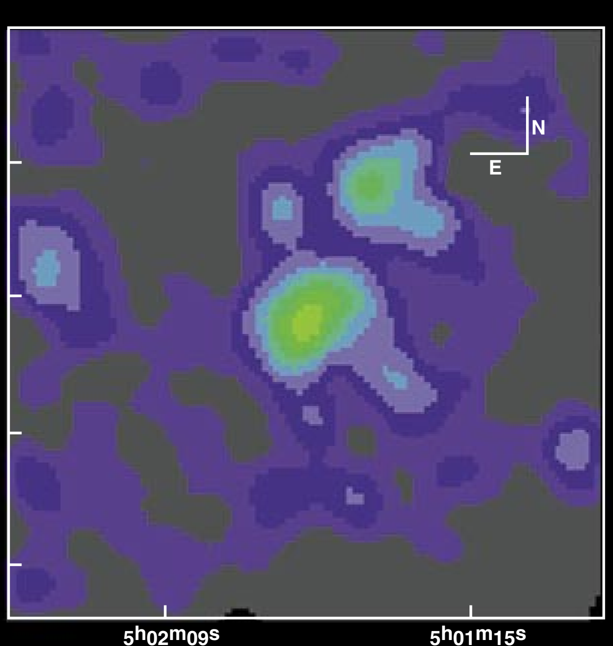
Este descubrimiento viene a sacarnos dos espinas recientes a quienes estudiamos este tipo de fenómenos. El *High Energy Transient Explorer* (HETE) (Explorador de alta energía para fuentes esporádicas), una nave equipada con instrumentos de gran precisión para localizar destellos de rayos gamma, fracasó en noviembre de 1986 porque no logró descolgarse de su cohete de lanzamiento; y la nave espacial rusa Marte 96, que tenía varios detectores de rayos gamma a bordo, se precipitó en diciembre del mismo año sobre el océano Pacífico tras un fallo mecánico de su cohete. Estas cargas útiles formaban parte de un conjunto de instrumentos cuidadosamente proyectados para acometer una investigación definitiva sobre los orígenes de los destellos de rayos gamma. De los nuevos satélites equipados con instrumentos para la detección de estas fuentes, sólo *Beppo-SAX* —cuyos principales investigadores son, entre otros, Luigi Piro, Enrico Costa y John Heise— logró alcanzar el espacio el 20 de abril de 1996.

Los destellos de rayos gamma se descubrieron accidentalmente a finales de los años sesenta, gracias a la serie de naves espaciales del departamento de Defensa estadounidense denominadas Vela. Estos satélites se diseñaron para descubrir las detonaciones nucleares clandestinas que la Unión Soviética pudiera realizar en el espacio exterior, posiblemente ocultas tras la Luna. En vez de eso se encontraron con espasmos de radiación que no se originaban cerca de la Tierra. Los investigadores llegaron a la conclusión de que se había descubierto un nuevo fenómeno astronómico en 1973.

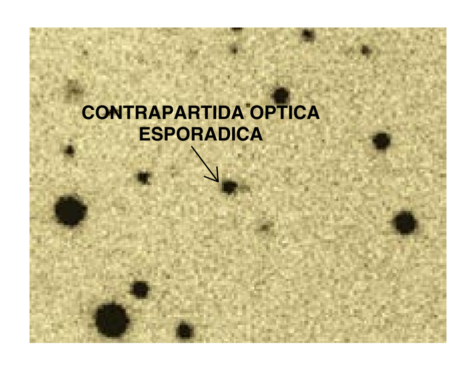
Estas observaciones iniciales originaron una especulación frenética sobre sus orígenes, invocándose los agujeros negros, las supernovas o los densos y oscuros restos de estrellas denominadas estrellas de neutrones. Pero seguían existiendo incógnitas fundamentales, que todavía perduran. Nadie sabía si los destellos provenían de una distancia de tan sólo cien años luz o de unos cuantos miles de millones de ellos, por lo que no podían hacerse más que conjeturas sobre su energía.

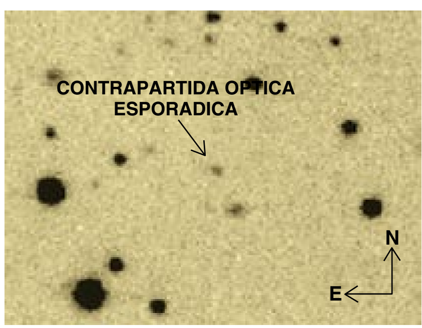
A mediados de los años ochenta ya se había logrado un consenso relativo a que los destellos se originaban en estrellas de neutrones de nuestra propia galaxia. Lo que intrigaba especialmente a los teóricos eran las líneas oscuras de los espectros de algunos de ellos, que hacían pensar en la presencia de intensos campos magnéticos. Se postuló que los rayos gamma se emitían por electrones sometidos a una aceleración que alcanzaba velocidades relativistas cuando las líneas del campo magnético de una estrella de neutrones se cerraban sobre





3. IMAGEN DE RAYOS-X tomada por *Beppo-SAX* el 28 de febrero (*izquierda*). Sirvió para localizar el destello en un radio de unos cuantos minutos de arco, permitiendo a los telescopios terrestres iniciar su búsqueda. Para el 3 de marzo la fuente se había debilitado mucho (*derecha*).





4. IMAGENES OPTICAS de la zona del destello, tomadas por el telescopio William Herschel en las Islas Canarias, el 28 de febrero (*arriba*) y el 8 de marzo (*abajo*). El punto de luz que recoge la primera imagen se ha desvanecido en la segunda foto, lo que apunta a que sea un resplandor concomitante.

sí mismas. Un fenómeno parecido se produce en el Sol, aunque con energías mucho menores, y origina las fulguraciones.

El transbordador espacial *Atlantis* puso en órbita el Observatorio Compton de Rayos Gamma en abril de 1991, un satélite que lleva a bordo el experimento BATSE (*Burst and Transient Source Experiment*, o experimento para la detección de fuentes esporádicas y explosiones). Al cabo de un año, BATSE había frustrado todas nuestras expectativas. La distribución de los destellos de rayos gamma no se acomodaba a la Vía Láctea y tampoco pudo comprobarse que estuvieran asociados con galaxias cercanas o con cúmulos de ellas. Su distribución era, por el contrario, isotrópica, en el sentido de que cualquier dirección del firmamento contaba con el mismo número de ellos aproximadamente. Los teóricos se dieron prisa en refinar el modelo galáctico: los destellos provenían ahora de estrellas de neutrones situadas en el amplio halo esférico que rodea la galaxia.

Uno de los problemas que plantea este marco hipotético es que la Tierra está situada en los suburbios de la Vía Láctea, a unos 30.000 años luz de distancia del núcleo. Para que nos encontrásemos cerca del centro del halo galáctico, éste tendría que ser verdaderamente enorme, de unos 600.000 años luz de radio externo. Y si así fuese, el halo de la vecina galaxia de Andrómeda, que tendría un tamaño similar, empezaría a aparecer en la distribución de los destellos de rayos gamma, cosa que no ocurre. Es ésta una objeción que logran superar algunos modelos especiales, que proponen que las estrellas de neutrones brillan en la misma dirección en que se mueven.

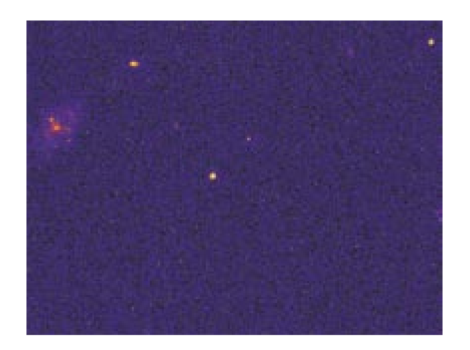
Esta uniformidad ha convencido a la mayoría de los astrofísicos de que los destellos provienen de distancias cosmológicas, del orden de tres a diez mil millones de años luz. A tales distancias, sin embargo, los destellos deberían mostrar los efectos de la expansión del universo. Las galaxias muy distantes se alejan de la Tierra a grandes velocidades, cosa que sabemos porque la luz que emiten se desplaza hacia frecuencias menores o más rojas. Los destellos de rayos gamma también deberían presentar un corrimiento al rojo, además de un aumento de duración.

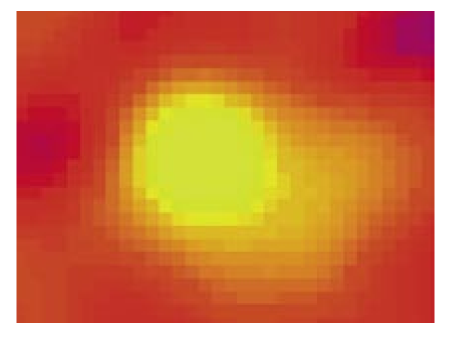
BATSE no puede desgraciadamente detectar las líneas oscuras o brillantes que aparecen en el espectro de los rayos gamma y que son característicos de los elementos específicos cuyos desplazamientos delatarían un corrimiento al rojo; tampoco detecta las líneas oscuras que encontraron las naves que le precedieron. Un espectro óptico del resplandor posterior de GRB 970228, de color azul y de aspecto uniforme, desprovisto de líneas indicadoras, se obtuvo en abril desde el telescopio Keck en Hawai. Pese a ello, Jay Norris, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard, de la NASA, y Robert Mallozzi, de la Universidad de Alabama (Huntsville), han realizado un análisis estadístico de los destellos observados, llegando a la conclusión de que los más débiles y, por ende, los más distantes, muestran tanto un retraso temporal como un corrimiento al rojo. Existen, sin embargo, otras formas, más controvertidas, de interpretar estos datos.

GERALD J. FISHMAN y DIETER H. HARTMANN han aportado sus habilidades al estudio de los destellos de rayos gamma. Fishman es un experimentador —el investigador principal de BATSE e investigador *senior* en el Centro de Vuelos Espaciales Marshall de la NASA en Huntsville, Alabama—. En tres ocasiones recibió la medalla que otorga la NASA en reconocimiento de logros científicos excepcionales y en 1994 recibió el premio Bruno Rossi de la Sociedad Americana de Astronomía. Hartmann es un astrofísico teórico adscrito a la Universidad de Clemson en Carolina del Sur. Se doctoró en 1989 por la Universidad de California en Santa Cruz. Además de la astronomía de rayos gamma, sus principales intereses se centran en la dinámica química y en la evolución de galaxias y estrellas.

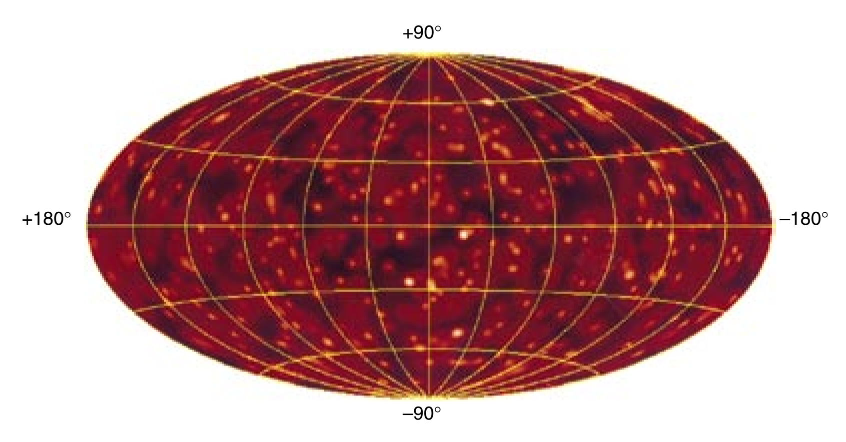
Una catástrofe cósmica

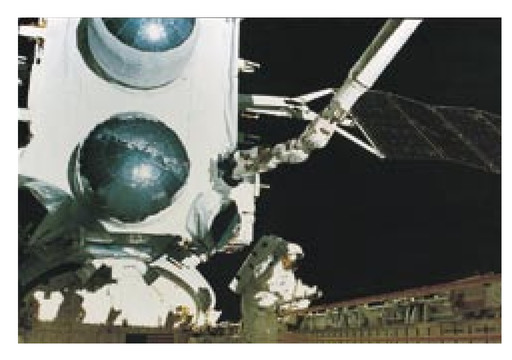
Uno de los rasgos que más dificultan la explicación de los destellos es su gran variabilidad. Pueden durar desde 30 milisegundos hasta casi mil segundos, llegando en una ocasión a 1,6 horas. Algunos muestran intensos espasmos de radiación, sin que se puedan detectar emisiones entre ellos, mientras que otros son continuos. También los espectros son complejos. La mayor parte de la energía de un destello se produce en forma de radiación de entre cien mil y un millón de electronvolt, lo que implica que estamos ante fuentes





5. UNA LARGA EXPOSICION del remanente óptico de GRB 970228 fue tomada por el telescopio espacial Hubble. El resplandor (*centro de la imagen superior*), visto de cerca (*abajo*), presenta un brillo de fondo débil y alargado, que pudiera corresponder a la galaxia donde se produjo el destello.





6. DISTRIBUCION DE DESTELLOS en el cielo, según medidas realizadas por el BATSE, que no muestra acumulaciones en la Vía Láctea (*a lo largo de la línea ecuatorial*). BATSE está instalado a bordo del Observatorio Compton (*derecha*), que se muestra durante su fase de prelanzamiento.

cuyas temperaturas son excepcionalmente elevadas (la energía de los fotones de la luz óptica, es decir la principal radiación procedente del Sol, es de unos pocos electronvolt). Conforme pasa el tiempo, hay destellos que se deslizan suavemente hacia frecuencias más bajas, como son los rayos X. Aunque la cola de rayos X tiene mucha menos energía, contiene gran número de fotones.

Si se originan a distancias cosmológicas, los destellos tendrán energías de quizá 10^{51} erg. (Bastan unos 1000 erg para levantar un centímetro a un objeto de un gramo de peso.) Esta energía tiene que emitirse en un brevísimo lapso de tiempo (segundos e incluso menos) desde una zona muy pequeña del espacio, de algunas decenas de kilómetros de diámetro. Parecería como si estuviéramos observando una bola de fuego.

La primera dificultad es intentar concebir unas circunstancias concretas que pudiesen llevar a la creación de una bola de fuego de la energía suficiente. La mayoría de los teóricos se inclina por un marco hipotético en el que se produce el desplome de un sistema binario de estrellas de neutrones (*véase* "Estrellas binarias de neutrones", por Tsvi Piran; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1995). Una tal pareja de estrellas desprendería la energía gravitatoria suficiente en forma de radiación y, en consecuencia, sus dos componentes se irían acercando paulatinamente, describiendo movimientos en forma de espiral, llegando incluso a unirse para formar un agujero negro. Los modelos teóricos predicen que pasan entre diez mil y un millón de años antes de que se produzca un acontecimiento de este tipo en una galaxia. Hay unos diez mil millones de galaxias en el espacio observado por BATSE, lo que podría traducirse en unos mil destellos al año, cifra que concuerda con las observaciones.

Hay variantes de este modelo que ponen en juego a una estrella de neutrones, a una normal o a una enana blanca y las hacen chocar con un agujero negro; los detalles de estas fusiones son objeto de muchos estudios. Pero se está de acuerdo en que cuando, digamos, dos estrellas de neutrones están a punto de desaparecer en el interior de un agujero negro desprenden una energía de unos 10^{53} erg. Esta energía se produce en forma de neutrinos y antineutrinos, que de algún modo se tienen que convertir en rayos gamma. Esta transformación requiere una serie de acontecimientos: los neutrinos chocan con los antineutrinos y se producen electrones y positrones, que a su vez se aniquilan y producen fotones. Es una pena que este proceso sea muy ineficaz, de modo que simulaciones recientes hagan pensar que no podría proporcionar fotones en cantidad suficiente.

Hay algo todavía peor. Si en la bola de fuego hubiese abundancia de partículas pesadas, del tipo de los protones, se reduciría la energía de los rayos gamma. Dado que la colisión de dos estrellas de neutrones genera siempre un popurrí de partículas, puede darse por descontada tal contaminación de protones. Resulta entonces que toda la energía terminará por convertirse en energía cinética de los protones, sin que quede nada para la radiación. Peter Mészáros, de la Universidad del Estado de Pennsylvania, y Martin J. Rees, de la de Cambridge, han propuesto una salida a este dilema diciendo que cuando la bola de fuego en expansión —formada esencialmente por protones calientes— se precipita contra el gas circundante, produce una onda de choque. Es en ese momento cuando los electrones, acelerados por los intensos campos electromagnéticos de la onda, emiten rayos gamma.

Otra variante implica la existencia de choques internos, que se producen cuando partes distantes de la bola de fuego chocan entre sí a velocidades relativistas, generando también rayos gamma. Ambos modelos de choque tienen como consecuencia que los destellos de rayos gamma deberían ir seguidos de resplandores de rayos X y de luz visible durante períodos de tiempo considerables. Mario Vietri, del Observatorio Astronómico de Roma, ha vaticinado la existencia de resplandores de rayos X detectables, cuya duración sería hasta de un mes, a la vez que indica que tal fenómeno no lo justifican los modelos de halo. GRB 970228 constituye la prueba más fehaciente hasta la fecha en favor de la existencia de la cola. Sigue habiendo, empero, algunos problemas: el desplome de los sistemas binarios no explica algunos destellos de larga duración. El año pasado, por ejem-



7. TELESCOPIOS AUTOMATICOS, situados en una llanura próxima al Laboratorio Lawrence Livermore, se dedican a la búsqueda del destello segundos después de que BATSE dé a conocer su emplazamiento.





8. UNA AMPLIA GAMA DE INSTRUMENTOS contribuye al estudio de los destellos de rayos gamma. El satélite *Beppo-SAX* (mostrado a la izquierda durante la fase de ensamblaje) está equipado con detectores de rayos X y gamma, que han demostrado su valía para la localización de los últimos destellos registrados. El Telescopio William Herschel (*centro*), situado en las Islas Canarias, captó la contrapartida óptica de GRB 970228. La red de radiotelescopios VLA (*derecha*), de Nuevo México, realizó en mayo la primera detección de ondas de radio procedentes de un destello.

plo, BATSE encontró uno que duró 1100 segundos, que probablemente se repitió dos días más tarde.

Hay otras formas de generar los rayos gamma necesarios. Nir Shaviv y Arnon Dar, del Instituto Tecnológico de Israel, en Haifa, inician su estudio con una bola de fuego de origen desconocido, rica en metales pesados. Se produce la interacción entre iones de hierro o de níquel calientes y radiación procedente de estrellas cercanas y así se originan los rayos gamma. Las simulaciones demuestran que los perfiles temporales de los destellos resultantes concuerdan bien con las observaciones, pero una bola de fuego formada sólo por elementos pesados parece poco verosímil.

Otro mecanismo que tiene gran aceptación se basa en generadores magnéticos de enorme potencia, parecidos a las dínamos que giran en los núcleos de galaxias. Los teóricos aventuran que, en lugar de una bola de fuego, la fusión de dos estrellas —de cualquier tipo— podría generar un agujero negro, rodeado por un grueso disco rotatorio de restos estelares. Tal disco tendría una edad limitada, pero los campos magnéticos de su interior serían asombrosos, unas 10^{15} veces los de la Tierra. Al igual que una dínamo normal y corriente, los campos extraerían la energía rotatoria del sistema, canalizándola hacia dos chorros que emanarían a lo largo del eje de rotación.

Los núcleos de estos chorros —las regiones más cercanas al eje— estarían desprovistas de contaminación por protones. Los electrones relativistas de su interior generarían un pulso intenso de rayos gamma. Aunque todavía falten por esclarecer muchos detalles, la mayoría de tales marcos hipotéticos garantizan que las conjunciones de estrellas sean las principales aspirantes para la explicación de los destellos.

Los destellos de rayos gamma han protagonizado más de 2500 artículos, alrededor de uno por destello. Al ser tan esporádicos, resulta difícil su observación con diversos instrumentos; la consiguiente pobreza de datos ha dado pie a la proliferación de teorías.

Si se detectase un destello que hubiese sufrido desdoblamiento gravitatorio, se confirmaría que se producen a distancias cosmológicas. Tal cosa pudiera suceder si una galaxia, u otro objeto de gran masa, actuase como lente gravitatoria y desviase sus rayos hacia la Tierra. Cuando la luz óptica de una estrella distante sufre este proceso, origina imágenes múltiples de la verdadera estrella, dispuestas en forma de arcos alrededor de la lente. Los rayos gamma no pueden detectarse con tanta precisión, pues los instrumentos que actualmente se utilizan son de escasa resolución espacial.

Tampoco los destellos son fuentes estables como las estrellas, por lo que un destello desdoblado se nos aparecerá como dos, procedentes más o menos de la misma dirección; sus espectros y perfiles temporales serán idénticos, pero las intensidades y los tiempos de llegada serán diferentes. La disparidad temporal se explicaría al atravesar los rayos trayectorias curvadas de diferentes longitudes a través de la lente.

Para determinar con más precisión los orígenes de la explosión subyacente necesitamos disponer de datos de otros tipos de radiación que pudieran acompañarla. Y todavía mejor sería identificar la fuente. Hasta que se produjo la observación fortuita de GRB 970228 —nos sigue asombrando que su resplandor posterior durara lo bastante como para que pudiera observarse— tales "contrapartidas" se habían mostrado extraordinariamente esquivas. Para encontrar otras habrá que localizar los destellos con mucha precisión.

Observar y esperar

Kevin Hurley, de la Universidad de California en Berkeley, y Thomas Cline, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard, de la NASA, llevan trabajado juntos desde principios de los años setenta para establecer "redes interplanetarias" de instrumentos detectores de los destellos. Tratan de montar un detector de rayos gamma en cualquier nave espacial que se preste y de enviar al espacio dispositivos especialmente diseñados para que la precisión de las localizaciones sea de unos pocos minutos de arco, lo que podría hacerse comparando los tiempos de llegada de los destellos a naves separadas por enormes distancias.

La eficacia de la red cambia mucho de un año a otro, dependiendo del número de instrumentos implicados y de la separación que medie entre ellos. Actualmente consta de cinco elementos: BATSE, *Beppo-SAX* y el satélite militar DMSP, situados cerca de la Tierra; *Ulysses*, emplazado mucho más allá del plano del sistema solar; y la nave espacial *Wind*, que orbita el Sol. Los datos procedentes de *Beppo-SAX*, *Ulysses* y *Wind* se usaron para triangular (calcular distancias trigonométricamente) a GRB 970228. (En aquel momento, BATSE estaba situado a la sombra de la Tierra.) Por desgracia el proceso es

muy lento, requiriendo ocho horas en el mejor de los casos.

El factor temporal es esencial si hemos de dirigir diversos detectores hacia un destello mientras refulge. Scott Barthelmy, de la Asociación de Investigación Espacial Universitaria del Goddard, ha desarrollado un sistema denominado BACODINE (del anglosajón *BAtse COordinates DIstribution NEtwork*, o red de distribución de las coordenadas del BATSE), destinada a transmitir en pocos segundos los datos relativos a los emplazamientos de los destellos desde el BATSE a los telescopios terrestres.

BATSE consiste en ocho detectores de rayos gamma, dirigidos hacia diferentes puntos del espacio desde las ocho esquinas del satélite Compton; la comparación de la intensidad de un destello entre estos detectores proporciona en pocos segundos su situación con una precisión de algunos grados. Hay veces que BACODINE logra localizar la explosión mientras se está produciendo. Las coordenadas se transmiten entonces a través de Internet a varias docenas de observatorios de todo el mundo. Cinco segundos después los telescopios automáticos del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, entre otros, ya están dirigiendo sus miradas en la dirección indicada.

Por desgracia son sólo los telescopios más rápidos, de pequeñas dimensiones y que no pueden captar imágenes débiles, los que pueden participar en esta campaña. Los dispositivos del Livermore, por ejemplo, no hubiesen detectado el resplandor posterior de GBR 970228 (a no ser que la emisión óptica que se produce inmediatamente después de la explosión fuera mucho más brillante, como proponen varias teorías). Se necesita disponer de telescopios cien veces más sensibles. Estos telescopios de tamaño medio tendrían que ser automáticos, para poder girar con rapidez, además de poder explorar regiones amplias del cielo. Si detectasen un resplandor esporádico, determinarían su posición con bastante precisión, permitiendo que telescopios mucho mayores, como el Hubble y el Keck, iniciasen la búsqueda de la contrapartida.

El débil fulgor observado durante bastante tiempo tras el acontecimiento de GRB 970228 aporta nuevas esperanzas a este método. Se volverá a construir la misión HETE, dirigida por George Ricker, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, de cara a su lanzamiento dentro de dos años. Estudiará todo el cielo por medio de detectores de rayos X capaces de localizar los destellos con un margen de error de algunos minutos de arco. Una red de telescopios ópticos terrestres recibirá datos sobre las localizaciones e iniciará inmediatamente la búsqueda de los fenómenos esporádicos.

Es claro que desconocemos el porcentaje de explosiones que exhibirá un resplandor susceptible de detección; GRB 970228 podría ser una excepción rara y fortuita. Incluso un campo de observación de pocos minutos de arco contiene demasiados objetos débiles como para que la búsqueda de contrapartidas sea tarea fácil. Si se consiguiera obtener precisiones de fracciones de segundo de los propios rayos gamma sería excelente, por lo que se ha propuesto la construcción de nuevos tipos de telescopios especiales que puedan determinar instantáneamente la posición de un destello con tal precisión.

Para perfeccionar aún más los modelos se necesitará observar radiaciones de frecuencias distintas que las observadas actualmente. El Telescopio para el Experimento de Rayos Gamma Energéticos (EGRET), a bordo del satélite Compton, ha detectado unos cuantos destellos que emitían radiación de hasta diez mil millones de electronvolt y que a veces duraron varias horas. El Telescopio Espacial de Rayos Gamma de Zona Amplia (GLAST), un satélite que está proyectando un equipo internacional de científicos, será de gran ayuda para los teóricos. Los fotones de energía aún mayor —de aproximadamente un billón de electronvolt— podrían capturarse por telescopios terrestres especiales de rayos gamma. En el otro extremo del espectro, los rayos X blandos, con energías de hasta un kiloelectronvolt (keV), ayudan a verificar los modelos de los destellos al tiempo que fijan con más precisión las posiciones. Existen grandes posibilidades de que en el rango de 0,1 a 10 keV se descubran líneas de absorción o de emisión que nos darían amplísima información sobre la bola de fuego subyacente y los campos magnéticos. Tales líneas proporcionarían también medidas directas del corrimiento al rojo y, por tanto, de las distancias. En centros de todo el mundo se están construyendo instrumentos muy sensibles para detectar rayos X blandos.

Antes de que pudiéramos terminar este artículo nos han llegado noticias de otro excelente logro. Los operadores de *Beppo-SAX* encontraron un destello de 15 segundos en la

noche del 8 de mayo. Poco después, Howard E. Bond, del Instituto Científico del Telescopio Espacial en Baltimore, fotografió la zona usando el telescopio óptico de 0,9 metros de Kitt Peak; a la noche siguiente, un punto de luz registrado en ese campo ya había experimentado un notable incremento de brillo. Otros telescopios confirmaron que, tras el máximo de luminosidad registrado el 10 de mayo, la fuente empezó a desvanecerse. Esta es la primera vez que se ha podido observar un destello de rayos gamma mientras alcanza su máximo en la zona óptica, lo que, por sorprendente que parezca, sucedió con varios días de retraso respecto de su máximo en la zona gamma.

El 13 de mayo y también por primera vez, el VLA (*Very Large Array*), una enorme de red de radiotelescopios instalada en Nuevo México, detectó emisiones de radio procedentes de los restos de la explosión. Lo que resulta todavía más emocionante es que el espectro de este destello, prácticamente azul, tomado el 11 de mayo con el telescopio Keck II (Hawai), muestre algunas líneas oscuras, causadas, al parecer, por el hierro y el magnesio de una nube cercana. Los astrónomos del Instituto de Tecnología de California sostienen que los corrimientos de estas líneas de absorción apuntan a una distancia de más de siete mil millones de años luz. Si esta interpretación fuese correcta, quedaría definitivamente establecido que los destellos se producen a distancias cosmológicas.

Si así fuera, no transcurriría mucho tiempo antes de que conociésemos el catastrófico acontecimiento que lo produjo, así como la causa de cualquier otro que pudiera estar iluminando los cielos mientras usted se detiene en estas páginas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE GAMMA-RAY BURST MYSTERY. D. H. Hartmann en *The Lives of Neutron Stars*. Dirigido por A. Alpar, Ü. Kiziloglu y J. van Paradijs. Instituto de Estudios Avanzados de la OTAN, *Kluwer Academic Publishers*, 1994.

GAMMA RAY BURSTS. G. J. Fishman y C. A. Meegan en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, volumen 33, págs. 415-458; 1995.

La página externa de la misión *Beppo-SAX* es accesible a través del WWW, en http://www.sdc.asi.it/.

Xenotrasplantes

Tras decenios de esfuerzos para superar la escasez de órganos procedentes de cadáveres, los cirujanos podrán obtenerlos de una nueva fuente

Robert P. Lanza, David K. C. Cooper y William L. Chick



Volemos con la imaginación a un día cualquiera de un futuro relativamente cercano. Primeras horas de la mañana. Un equipo de cirujanos extrae con decisión corazón, pulmones, hígado y páncreas de un donante. A renglón seguido un técnico especializado empaqueta estos órganos entre trozos de hielo y corre raudo hasta un aeropuerto cercano. Corazón e hígado aterrizan pocas horas después en una ciudad, los riñones en otra, mientras que los pulmones y el páncreas llegan a una tercera. Transportados rápidamente a hospitales de cada una de esas ciudades, los órganos seleccionados se trasplantan a pacientes afectados por graves enfermedades. Los órganos recién trasplantados funcionan y seis personas reciben con ellos una nueva inyección de vida. Lejos, en el centro de donantes, los cirujanos repiten el procedimiento una vez y otra; nuevos trasplantes se llevan a cabo en quirófanos distribuidos por todo el país. Sólo en ese día de nuestro relato se están realizando en un país como los Estados Unidos de América más de cien trasplantes.

¿Cómo es posible que se hayan encontrado tantos donantes de órganos? Hay una sencilla explicación. Los órganos no se extraen de cadáveres humanos, sino de cerdos. Aunque ese milagro médico no sea todavía una realidad, los autores de este artículo, al igual que otros investigadores, nos encaminamos hacia ello con paso seguro. Nuestros esfuerzos se ven respaldados por la conciencia clara de que el suministro de órganos humanos será siempre insuficiente para satisfacer una demanda acuciante. Son miles los pacientes que esperan trasplantes de corazón, hígado, riñón, pulmón o páncreas, y millones de personas se debaten entre la vida y la muerte afectadas por enfermedades graves que algún día podrían ser curables con otros tipos de donantes. La hemofilia, la diabetes e incluso las enfermedades de Alzheimer y de Parkinson se cuentan entre las que muy bien pudieran tratarse con células trasplantadas. Por eso la presión para encontrar nuevos caminos que permitan trasplantar células y órganos animales a pacientes —el xenotrasplante— aumenta de manera constante.

ROBERT P. LANZA, DAVID K. C. COOPER y WILLIAM L. CHICK comparten desde hace tiempo un gran interés por los temas relacionados con el trasplante de células y de órganos animales. Lanza, que recibió en 1983 el título de médico por la Universidad de Pennsylvania, es director del centro de biología de trasplantes BioHybrid Technologies en Shrewsbury, Massachusetts. Siendo aún estudiante, trabajó junto a Christiaan Barnard, uno de los pioneros del trasplante, y también con los inmunólogos Gerald Edelman y Rodney Porter, ambos galardonados con el Premio Nobel. Cooper es médico y doctor en ciencias por la Universidad de Londres y en la actualidad es uno de los inmunólogos de la Facultad de Medicina de Harvard y del Hospital General de Massachusetts. Anteriormente había trabajado como cardiocirujano especializado en trasplantes de corazón, al mismo tiempo que fue director de investigación y enseñanza en el Instituto de Trasplantes de Oklahoma. Chick recibió el título de médico en la Universidad de Nueva York en 1963. Fue profesor de bioquímica y medicina en la Facultad de Medicina de la Universidad de Massachusetts, donde fue también director del Centro de Investigaciones sobre Endocrinología y Diabetes. En la actualidad es presidente de BioHybrid Technologies.

Mezcla de especies

La idea de combinar partes de especies diferentes no es en absoluto nueva. En la mitología griega de hace más de tres milenios aparecen los centauros —seres mitad hombre, mitad caballo— y la Quimera, una combinación de león, cabra y serpiente. Ya en 1682 un médico ruso dio a conocer que había reparado el cráneo fracturado de un noble usando el hueso de un perro. Pero no fue hasta comienzos del siglo XX cuando los médicos intentaron con alguna regularidad injertar tejidos de animales al hombre. Por ejemplo, en 1905 un cirujano francés injertó trozos de riñón de conejo a un niño que padecía un fallo renal. “Los resultados inmediatos —escribió— fueron excelentes.” Sin embargo, el niño murió unas dos semanas después.

Durante los dos decenios siguientes algunos médicos intentaron trasplantar órganos de cerdo, cabra, oveja y mono a diversos pacientes. Estos injertos fallaron pronto, por razones incomprensibles en aquel entonces. Antes de las investigaciones pioneras del premio Nobel Sir Peter Medawar en la Universidad de Londres durante los años cuarenta, los médicos tenían ideas bastante limitadas acerca de las bases inmunológicas del rechazo. Así, con sólo fracasos en su haber, la mayoría de los médicos perdieron progresivamente el interés por el trasplante. Pero algunos investigadores perseveraron y Joseph E. Murray y sus colaboradores del Hospital Peter Bent Brigham de Boston realizaron con éxito el primer trasplante de riñón en 1954. Evitaron el rechazo inmunológico trasplantando un riñón entre hermanos gemelos idénticos (cuyos órganos eran indistinguibles para sus sistemas inmunitarios). Murray y otros fueron luego capaces de trasplantar riñones de gemelos más distintos y, finalmente, de donantes no emparentados, administrando fármacos para suprimir la respuesta inmunitaria innata del receptor.

La práctica médica ha pasado desde entonces a incluir trasplantes de corazón, pulmón, hígado y páncreas. Pero estos logros han acarreado consigo también la tragedia: a causa de la penuria de órganos disponibles, la mayoría de las personas necesitadas no pueden conseguir su tratamiento. De las decenas de millares de pacientes que se consideran anualmente como buenos candidatos para un trasplante, son menos de la mitad los que lo reciben. La escasez será aún mayor una vez que los médicos perfeccionen los métodos para tratar la diabetes mediante el trasplante de células de los islotes pancreáticos en los que se produce la insulina. El reemplazo de los islotes es más simple que el trasplante de todo un páncreas, pero puede requerir el almacenamiento de células de varios donantes para tratar a cada paciente.

Fue una suerte que los investigadores no abandonaran por completo la idea de usar tejidos animales en los pacientes después de que los trasplantes de órganos humanos se pusieran de moda. Los investigadores médicos continuaron estudiando durante los años sesenta las razones por las que el trasplante de órganos entre especies muy diferentes lleva rápidamente al fracaso. Una de las causas principales, según descubrieron, es que la sangre del receptor



1. EL TRASPLANTE DE TEJIDOS animales al hombre (xenotrasplantes) se ha intentado experimentalmente usando una variedad de donantes, desde ranas a babuinos y cerdos. La mayoría de estas tentativas terminó con un rápido fracaso. Pero en plazo no lejano pudieran perfeccionarse las maneras de trasplantar determinados órganos, como el corazón, utilizando cerdos especialmente tratados por ingeniería genética.

contiene moléculas de anticuerpos que se unen a los tejidos donados. (Estos anticuerpos, que normalmente se dirigen contra las bacterias infecciosas, pueden también responder frente a los componentes de órganos trasplantados.) La unión de estos anticuerpos activa entonces unas proteínas especiales del "complemento", presentes en la sangre, que a su vez disparan la destrucción del injerto.

Este rechazo hiperagudo del tejido foráneo —que comienza a los pocos minutos o, a lo más, horas después de la intervención— destruye los capilares del órgano trasplantado, provocando una hemorragia generalizada. Aunque esta reacción representa un obstáculo considerable para los trasplantes, experimentos recientes hacen que los investigadores piensen que conseguirán superarla.

Por ejemplo, en 1992, David J. G. White y sus colaboradores de la Universidad de Cambridge consiguieron producir cerdos "transgénicos", que poseen en la pared interna de sus vasos sanguíneos proteínas que pueden evitar que las proteínas del complemento humano lleguen a dañarlos. Hicieron esto introduciendo en los embriones de cerdo un gen humano que dirige la producción de una proteína humana inhibidora del complemento [*véase* "Producción de fármacos a través de animales transgénicos", por William H. Velander, Henryk Lubon y William N. Drohan; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo, 1997]. No se ha comprobado todavía cómo se comportarán los tejidos de estos cerdos en un organismo humano, pero estos órganos producidos por ingeniería genética han funcionado por períodos de hasta dos meses en monos, porque las células del cerdo que están en contacto directo con el sistema inmunitario del huésped son capaces de vencer la primera oleada del ataque.

Puede que haya otros métodos que también sirvan para controlar el rechazo hiperagudo. Varios investigadores, entre los que estaba uno de nosotros (Cooper), identificamos, en 1991 y en tejidos de cerdo, los fragmentos moleculares específicos, o antígenos, contra los que se dirigen los anticuerpos humanos. Las células que recubren la pared interna de los vasos sanguíneos tienen en su superficie antígenos constituidos por un grupo particular de azúcares. Así sería posible producir (y ciertamente clonar) una línea de cerdos, fruto de la ingeniería genética, que careciese de ese grupo problemático del azúcar.

Un plan de actuación consistiría en eliminar primero la enzima que incorpora el azúcar. También podría intentarse conseguir cerdos que tuviesen un gen específico de una enzima que reemplazase el azúcar problemático con otra estructura de carbohidratos. Por ejemplo, podría darse a los cerdos el gen correspondiente a una enzima que reemplazase los antígenos existentes por el antígeno del grupo sanguíneo de tipo 0, que no despierta respuesta inmunitaria. En principio no debería ser tampoco imposible eliminar el azúcar indeseable introduciendo en el cerdo el gen correspondiente a una enzima que lo degrade.

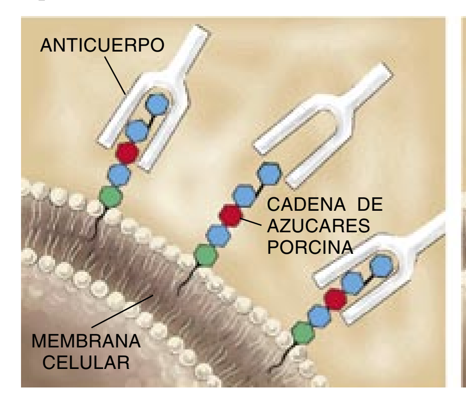
Otro método más consistiría en evitar el rechazo hiperagudo alterando el sistema inmunitario del receptor de tal manera que no pueda destruir el tejido trasplantado. Por ejemplo, usando un aparato estándar, los médicos pueden eliminar de la sangre del paciente todos los anticuerpos dirigidos contra el tejido del cerdo. También se pueden eliminar temporalmente las proteínas del complemento o interferir su activación. Es notable que los estudios con animales indiquen que, si se trasplanta un órgano de cerdo mientras el sistema inmunitario del paciente está suprimido, puede que el órgano llegue a una acomodación, a un estado que le capacita para sobrevivir incluso después de que los anticuerpos del huésped y el complemento vuelvan a los niveles normales, aunque las razones de por qué esto sea así permanezcan en gran parte misteriosas. El órgano trasplantado continúa entonces funcionando a pesar de la falta de tolerancia por parte del sistema inmunitario del huésped.

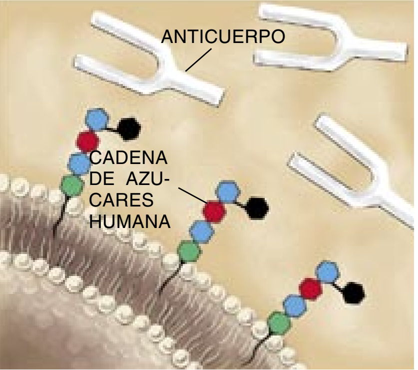
Por desgracia los investigadores no han conseguido todavía inducir con seguridad la acomodación en los animales que sufren un xenotrasplante. Pero Guy Alexandre y sus colaboradores de la Facultad de Medicina de la Universidad de Lovaina la han conseguido en determinados pacientes que habían recibido órganos de donantes humanos cuyos grupos sanguíneos eran incompatibles, una situación que también origina un rechazo hiperagudo.

Mejora de la tolerancia

Los investigadores que estudian el xenotrasplante confían en que alguna combinación de estos métodos permita combatir las reacciones inmunológicas nocivas inmediatas. Pero, incluso una vez conseguido esto, los injertos de tejidos animales en los pacientes serían aún presa de formas tardías del rechazo inmunitario, que puede tardar días o semanas en desarrollarse. La llamada respuesta inmunitaria celular a los injertos de animales es probable que sea al menos tan intensa como los ataques violentos que los leucocitos del sistema inmunitario dirigen a menudo contra los órganos trasplantados de una persona a otra. La evitación de tales reacciones tardías podría requerir dosis enormes de fármacos inmunorrepresores, como la ciclosporina, administrados indefinidamente, con los riesgos consiguientes de toxicidad, infecciones y otras complicaciones.

Los nuevos agentes inmunosupresores que pudieran descubrirse ser-





2. UNA REACCION DE RECHAZO HIPERAGUDA es bastante probable que se produzca en un paciente al que se ha trasplantado un órgano de cerdo. Se instaura después de que los anticuerpos se unan a las cadenas lineales de azúcares que recubren los vasos sanguíneos del cerdo (*izquierda*). Pero los tejidos de cerdos especialmente manipulados por ingeniería genética, que llevarían azúcares angulares propios de los grupos sanguíneos de tipo 0, no deberían provocar este tipo de reacción.

Episodios en la historia del xenotrasplante



1682

TEJIDOS ANIMALES injertados por vez primera en una persona. Un médico reparó el cráneo fracturado de un noble ruso con un trozo del de un perro. Al parecer la cirugía tuvo éxito, pero la Iglesia ortodoxa rusa amenazó al noble con la excomunión, urgiéndole a que le retirasen el injerto.

Finales del siglo XIX



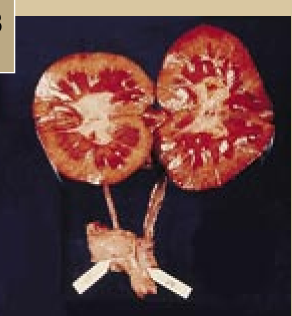
LA PIEL DE RANA se injertó con frecuencia para tratar quemaduras o úlceras cutáneas de los pacientes. Un cirujano del ejército británico dijo haber utilizado este procedimiento centenares de veces con buenos resultados.

1920



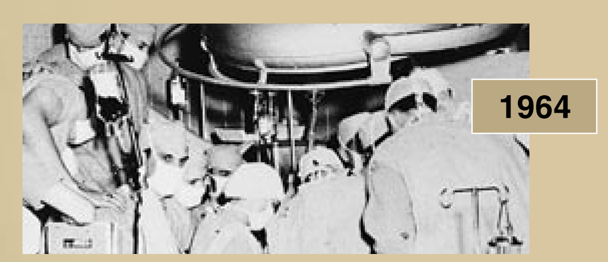
SERGE VORONOFF, un médico que había emigrado a París, comenzó a trasplantar tejidos de testículos de mono a hombres de edad avanzada. Esta técnica de rejuvenecimiento sexual conseguía infundir nuevo vigor a los pacientes, según sus informes, aunque no logró vencer el escepticismo de los especialistas.

De 1963 a 1965



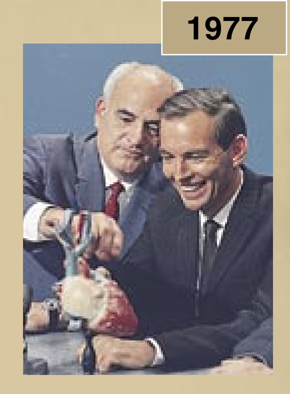
RIÑONES DE CHIMPANCE se trasplantaron a trece pacientes por Keith Reemtsma, un profesor de la Universidad de Luisiana. Una de sus pacientes sobrevivió nueve meses tras la operación (incluso volvió a su trabajo como maestra) antes de sucumbir a un grave desequilibrio

1964



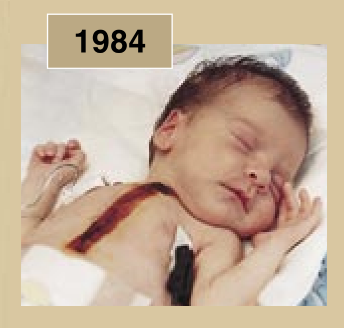
EL PRIMER TRASPLANTE CARDIACO llevado a cabo en seres humanos utilizó un corazón de chimpancé y se realizó gracias a los esfuerzos pioneros de James D. Hardy en la Universidad de Mississippi. El corazón trasplantado falló a las dos horas, porque su tamaño era demasiado pequeño para mantener la circulación del paciente.

1977



CHRISTIAAN BARNARD (*a la derecha*), que se había hecho famoso diez años antes por haber realizado con éxito el primer trasplante de corazón, intentó utilizar corazones de babuino y de chimpancé como bombas accesorias en dos pacientes cuyos corazones no funcionaron bien después de la cirugía cardiaca. Los corazones animales no consiguieron mantener la vida de los enfermos.

1984



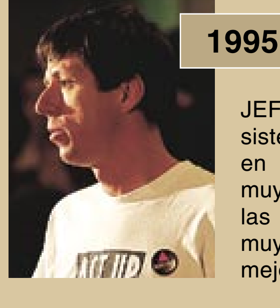
BABY FAE, un niño prematuro nacido con una malformación cardiaca, recibió un corazón de babuino. A pesar del uso de un nuevo fármaco inmunosupresor, la ciclosporina, sólo se consiguió prolongar su vida veinte días más.

1992



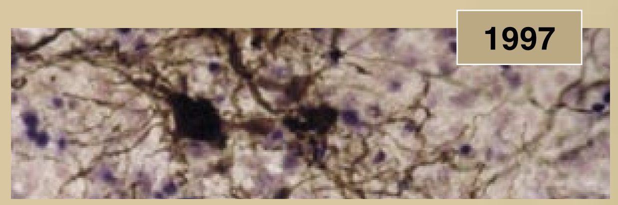
LOS TRASPLANTES hepáticos de babuinos a seres humanos, realizados en la Universidad de Pittsburgh, constituyeron un éxito a medias. Un paciente sobrevivió durante más de dos meses con el hígado del animal. Pero la enorme inmunosupresión necesaria para evitar el rechazo acabó abriendo el camino a una infección letal.

1995

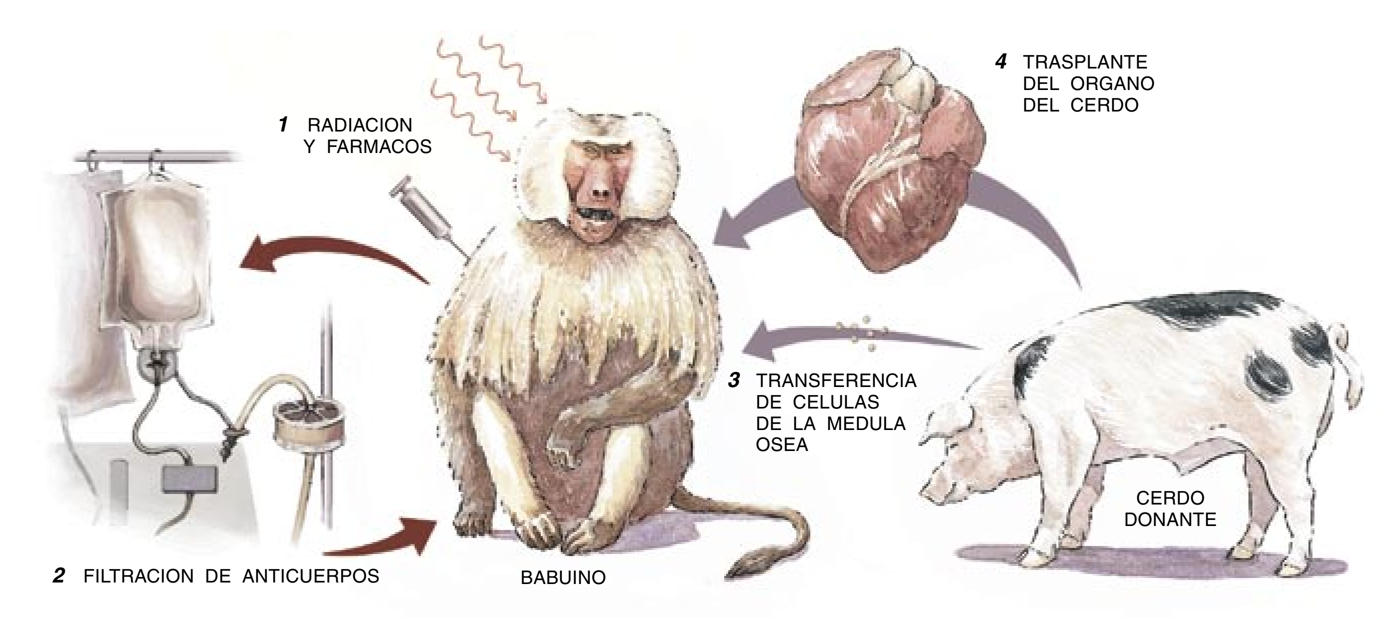


JEFF GETTY recibió células del sistema inmunitario de un babuino en un intento de combatir el sida muy avanzado que padecía. Aunque las células del babuino murieron muy pronto, la enfermedad pareció mejorar misteriosamente.

1997



PRUEBAS CLINICAS con células nerviosas fetales de cerdo trasplantadas a pacientes con enfermedad de Parkinson parecen revelar un cierto éxito. Las células porcinas inyectadas sobrevivieron durante más de siete meses, al menos en el cerebro de una persona.



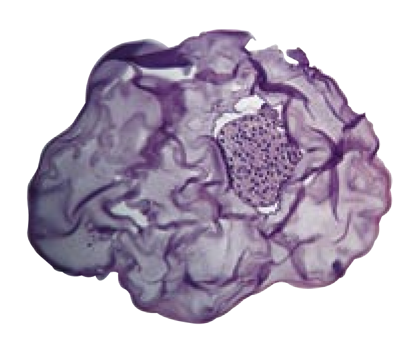
3. LA PREVENCION del rechazo diferido en el trasplante de órganos de especies diferentes puede conseguirse alterando el sistema inmunitario del receptor de tal modo que incluya componentes del donante. Para probar este método en los animales, el babuino elegido para recibir células de la médula ósea (de donde surgen todas las células inmunitarias) de un cerdo fue sometido primero a irradiación y a un tratamiento con fármacos (*1*) para evitar el rechazo inmunitario de las células trasplantadas. La sangre del babuino también se filtró (*2*) para eliminar moléculas de anticuerpo que reaccionarían con las células del cerdo. Por último, el babuino recibió células de la médula ósea del cerdo donante (*3*). A continuación se vio que las células *T* asesinas aisladas del babuino no atacaban a las células pertenecientes al cerdo donante. Si otros componentes del sistema inmunitario del receptor pudieran domarse de igual manera, los órganos trasplantados pertenecientes a un cerdo (*4*) podrían sobrevivir indefinidamente en el nuevo huésped.

virían de ayuda, pero sería aún más deseable que el organismo humano pudiese prepararse para aceptar los tejidos animales sin requerir la terapia continuada con fármacos. Esa feliz condición podría parecer muy difícil de conseguir. Pero la esperanza surge de la observación de que la aceptación de órganos a largo plazo, o la tolerancia inmunológica, ha ocurrido espontáneamente en unas cuantas personas que han recibido órganos humanos. Los médicos de estos pacientes fueron capaces de reducir, primero, y de terminar eliminando, después, el régimen normal de fármacos inmunosupresores.

Aunque de momento sea una meta escurridiza, la inducción de tolerancia inmunológica es un área en la que cada vez se investiga más y en la que con toda seguridad se producirán avances. Es curioso que pudiera resultar más fácil conseguir la tolerancia para el xenotrasplante que para los trasplantes habituales. Los órganos humanos donados tienen que ser transportados urgentemente, en condiciones extremas, mientras que los órganos animales podrían estar disponibles cuando se necesitaran. Esa flexibilidad podría proporcionar a los médicos el tiempo adecuado para reprogramar el sistema inmunitario del receptor.

Hay una manera de inducir tolerancia que implica la modificación del sistema inmunitario del paciente con células de la médula ósea del animal donante. (La médula ósea es el lugar donde se producen todos los componentes de la sangre, incluidos los leucocitos del sistema inmunitario.) Una vez introducidas, las células donadas se diseminan y maduran, creando un sistema inmunitario "quimérico", que es en parte donador y en parte receptor. La meta es alterar el sistema inmunitario del paciente de tal manera que no considere extrañas ni las células donadas ni los tejidos que posteriormente se trasplanten del mismo animal.

David H. Sachs y sus colaboradores del Hospital General de Massachusetts inyectaron células de la médula ósea de cerdos donantes (junto con sustancias que estimulan la producción celular) en babuinos, siguiendo el método acabado de esbozar. Los babuinos habían sido sometidos a una tanda de radiaciones para deprimir temporalmente sus sistemas inmunitarios y evitar el rechazo de las células de la médula ósea del cerdo. Los investigadores filtraron además la sangre de los babuinos para eliminar los anticuerpos dirigidos contra los tejidos del cerdo y les administraron fármacos inmunosupresores por un breve período. Aunque los sistemas inmunitarios de los babuinos acabaron destruyendo la mayor parte de las células trasplantadas, algunas moléculas de ADN del cerdo sobrevivieron en uno de los babuinos durante casi un año. Y lo que es todavía más sorprendente, un componente importante del sistema inmunitario quimérico de



4. CELULAS ENCAPSULADAS de islotes del páncreas de un cerdo pueden servir para producir insulina en enfermos diabéticos. La membrana biodegradable de polímeros que rodea los islotes permite la salida de insulina, pero protege a los islotes del ataque de los componentes inmunitarios del huésped.

este babuino —las células asesinas *T*— ya no reaccionaba frente a las células del cerdo como si fueran extrañas.

Investigaciones de este tipo pudieran producir resultados que ayudasen a evitar el rechazo inmunitario de órganos animales trasplantados, aunque para conseguir métodos realmente eficaces habrá que esperar probablemente algunos años más. Hay otro enfoque para evadir el rechazo que está ya, en cambio, en fase de experimentación clínica: el inmunoaislamiento. Consiste en que se secuestra físicamente el tejido trasplantado dentro de una membrana que permite que la crucen las moléculas pequeñas (como son los nutrientes, el oxígeno y ciertos agentes terapéuticos), mientras que impide el acceso al injerto de las moléculas grandes (como son los anticuerpos) y de los leucocitos. Esta táctica no es factible más que en el caso de células aisladas o de pequeños fragmentos de tejidos, pero no cuando se trata de órganos enteros. No sirve, por tanto, para quien requiera un corazón o un riñón nuevos, pero podría ser útil para el tratamiento de muchas enfermedades. Y ofrece además algunas ventajas prácticas: las células, o las pequeñas masas de tejido, pueden manipularse con una cierta facilidad y pueden mantenerse fuera del organismo durante períodos más prolongados que cuando se trabaja con órganos completos.

Intentos recientes, en los que se han utilizado células animales encapsuladas para tratar fallos hepáticos, dolores crónicos y la esclerosis lateral amiotrófica (enfermedad de Lou Gehrig), han arrojado resultados prometedores tras las pruebas clínicas iniciales. La investigación médica podrá pronto intentar el implante de células animales inmunoaisladas para generar los factores de coagulación que necesitan los hemofílicos o para producir los factores de crecimiento del nervio que pueden ayudar a corregir el curso de alteraciones neurodegenerativas. Hay investigadores que intentan de manera especial el tratamiento de la diabetes con células de islotes pancreáticos del cerdo. El uso de dispositivos "perfundidos" (implantes de un cierto tamaño confinados dentro de una membrana y conectados al circuito sanguíneo del organismo) con este propósito presenta algunas desventajas evidentes, aunque uno de los autores (Chick) fue adelantado de este técnica. Las mayores son la intervención quirúrgica de cierta importancia que ha de sufrir el paciente y el riesgo de que la formación de coágulos obstruya el dispositivo. El uso de fibras de plástico huecas o de cámaras no conectadas con el flujo sanguíneo para aislar el sistema inmunitario del receptor tiene también sus inconvenientes: aunque la cirugía necesaria sería menos traumática que en el caso de un dispositivo perfundido, no está claro que el paciente vaya a tolerar bien los materiales plásticos y que no sea necesario cambiar el implante repetidamente en el transcurso del tiempo, cosa más que probable en una terapia de larga duración.

Lanza, Chick y sus colaboradores de BioHybrid Technologies han tratado de superar estas dificultades elaborando procedimientos para encerrar las células dentro de pequeñas cápsulas biodegradables, que puedan inyectarse bajo la piel o colocarse en la cavidad abdominal por medio de una jeringuilla. No se necesitaría administrar más de un gramo de islotes de cerdo encapsulados para mantener los niveles normales de insulina de un diabético. El número de células implicadas sería grande, pero el volumen total de estos implantes quedaría limitado a unas cuantas decenas de centímetros cúbicos.

Se acaban de realizar pruebas en las que células de islotes de vaca así encapsuladas conservaron su vitalidad durante seis semanas (momento en el

Cómo mantener a raya a los virus polizones

La observación de que los cerdos sólo han transmitido un escaso número de agentes patógenos al hombre, a pesar de siglos de contacto continuado, tranquiliza a muchos, permitiéndoles pensar que el trasplante de órganos procedentes de estos animales no habrá de producir nuevas y graves enfermedades. Pero sigue habiendo razones para ser cautos. Ciertos retrovirus —virus que incorporan su huella genética directamente en el ADN del huésped— se presentan como una posible amenaza. Los cerdos, al igual que otros mamíferos, contienen en su reserva genética algunos de los llamados provirus, secuencias de ADN que tienen la capacidad de dirigir la producción de partículas víricas infecciosas. (Hasta un 1 por ciento de nuestro ADN está constituido por este tipo de genes víricos.) La presencia de estas secuencias en los animales actuales se debe a episodios infecciosos de retrovirus que afectaron a sus antepasados, que fue cuando los virus insertaron su información genética en espermatozoides y óvulos. Su descendencia retuvo estos genes víricos, que fueron después pasando de generación en generación. La mayoría de estos virus vestigiales han ido evolucionando con el tiempo hasta quedar como formas inocuas para su huésped, pero algunos retienen la capacidad de expresar una actividad que pudiera producir enfermedades en otras especies.

Es natural, pues, que los investigadores se preocupen de las consecuencias que pudieran derivarse de la presencia de los provirus de los cerdos, una vez transferidos a un paciente junto con los tejidos trasplantados. No sólo se presenta la oportunidad de que los virus tengan acceso directo a las células humanas, sino también la de encontrar una víctima de susceptibilidad única, por el hecho de tener un sistema inmunitario debilitado, requisito necesario para mantener a salvo el órgano trasplantado. En estas circunstancias, los provirus porcinos podrían originar retrovirus activos que terminasen causando enfermedades. También es concebible que estos retrovirus porcinos sufrieran mutaciones en el huésped humano o se combinasen con retrovirus humanos y produjesen nuevos agentes patógenos. El resultado podría ser especialmente peligroso, pues, a diferencia de los virus de corta vida causantes de la gripe porcina, ciertos retrovirus son potenciales inductores de cáncer o de infecciones crónicas.

Los biólogos moleculares trabajan con afán para identificar los provirus que permanecen emboscados en el ADN del cerdo y pudieran originar problemas, para después eliminarlos de las cepas selectas. Probablemente habrá que hacer todavía grandes esfuerzos para que puedan realizarse las manipulaciones necesarias, pero los resultados de este trabajo contribuirán a que se disipe todo temor de que el xenotrasplante pueda ser causa de nuevas enfermedades humanas.

—R.P.L., D.K.C.C. y W.L.C.

que terminó el experimento) en los perros en que se habían implantado. Estos resultados, y otros realizados con ratones, ratas y conejos, indican que es bastante probable que los islotes de cerdo encapsulados sobrevivan también en el organismo del paciente durante plazos de entre varios meses y más de un año. Las cápsulas diminutas acabarían degradándose, por lo que no sería necesaria una nueva intervención quirúrgica para extraerlas cuando hubiera que renovar el suministro de células de islotes. Las pruebas clínicas de esta técnica podrían comenzar antes de un año.

El problema de las interferencias

La idea de que quizá pronto puedan hacerse xenotrasplantes despierta algunas preocupaciones. A muchos especialistas les produce especial inquietud la posibilidad de que los donantes animales puedan tener enfermedades que, como el virus Ebola o la enfermedad de las vacas locas, acaben afectando al hombre. Después de infectar a un paciente trasplantado, este tipo de agentes patógenos podría diseminarse por la población general y generar una epidemia. Hay razones para pensar que el VIH (el virus de la inmunodeficiencia humana causante del sida) tuvo su origen en los monos y que de alguna manera saltó la barrera de la especie e infectó al hombre, por ejemplo.

El uso generalizado de trasplantes de tejidos de monos o de babuinos parecería, pues, constituir un riesgo para la salud general. Es una suerte que la amenaza de una catástrofe de este tipo sea mucho más reducida cuando el donante es el cerdo. El hombre ha convivido con él durante milenios, a pesar de lo cual parece ser muy escaso el número de enfermedades humanas graves de probable origen porcino, con la sola excepción de algunas cepas del virus de la gripe.

Hay razones adicionales por las que los cerdos pudieran ser buenos donantes. Su crianza es relativamente fácil y poseen órganos de tamaño y fisiología comparables a los humanos. Existen ya razas de cerdos libres de agentes patógenos conocidos. Y, a diferencia de lo que ocurre con los primates, son pocas las voces que manifiestan preocupaciones de tipo ético por la matanza de estos animales, utilizados corrientemente para la alimentación humana.

Quedan pendientes muchas otras cuestiones que habrá que solucionar antes de que el trasplante de tejidos de cerdo para el tratamiento de enfermedades humanas se torne realidad. Aparte de la dificultad que representa el manejo del rechazo inmunitario, hay que asegurarse de que los órganos porcinos funcionen adecuadamente en los nuevos huéspedes. Corazones y riñones de cerdo lo han hecho durante algunas semanas en ciertos primates y todo hace pensar que esos mismos órganos funcionarían también en los seres humanos. Aunque es probable que el hígado de cerdo sea incapaz de realizar las numerosísimas funciones del hígado humano, el órgano trasplantado podría mantener vivo al paciente durante un cierto tiempo, tiempo que podría ser suficiente para que, por ejemplo, el propio hígado del paciente se recuperase de un fallo transitorio.

Puede que queden aún muchos años para que los médicos ganen esta partida frente a la evolución —como se ha calificado el propósito del xenotrasplante— y puedan substituir rutinariamente cualquier órgano gravemente enfermo por el de un animal. Pero el trasplante de células y tejidos aislados parece estar ya a punto de entrar de lleno en la moderna práctica médica. Seamos optimistas y esperemos que no habrá de pasar mucho tiempo antes de que se produzcan resultados espectaculares que despierten nuevas esperanzas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BARRIERS TO XENOTRANSPLANTATION. F. H. Bach, S. C. Robson, H. Winkler, C. Ferran, K. M. Stuhlmeier, C. J. Wrighton y W. W. Hancock en *Nature Medicine*, vol. 1, n.º 9, págs. 869-873; septiembre de 1995.

XENOTRANSPLANTATION AND XENOGENEIC INFECTIONS. L. E. Chapman, T. M. Folks, D. R. Salomon, A. P. Patterson, T. E. Eggerman y P. D. Noguchi en *New England Journal of Medicine*, vol. 333, n.º 22, páginas 1498-1501; 30 de noviembre de 1995.

YEARBOOK OF CELL AND TISSUE TRANSPLANTATION 1996/1997. Dirigido por Robert P. Lanza y William L. Click. Kluwer Academic Publishers, 1996.

XENOTRANSPLANTATION: THE XENOTRANSPLANTATION OF ORGANS AND TISSUES BETWEEN SPECIES. Segunda edición. Dirigida por D. K. C. Cooper, E. Kemp, J. L. Platt y D. J. G. White. Springer-Verlag, 1997.

Tambores líquidos

La medida de las frecuencias de vibración de una lámina de cristal líquido, que hace las veces de parche de tambor, confirma que, en ocasiones, formas diferentes generan frecuencias iguales. La forma de un tambor no es audible

Maria Brazovskaia, Catherine Even, Pawel Pieranski

Los ruidos que llegan hasta nosotros, con efectos más o menos agradables, son producto a veces de la vibración de cuerdas, pero es mucho más frecuente que resulten de la vibración de placas metálicas de diversas formas. La variación de dichas vibraciones se traduce en cambios del sonido, que pueden convertirse en síntomas de defectos en las partes de una máquina. Bien sabido es que las grietas se diagnostican a oído y que es a oído como se sabe si un motor "está a punto".

Gracias a los trabajos del físico inglés Rayleigh, en el siglo XIX, sabemos calcular el espectro de vibración de una membrana tensa sobre ciertos contornos sencillos (triángulos, círculos, cuadrados) o, lo que es igual, sabemos determinar sus frecuencias de vibración.

Los matemáticos han examinado el problema recíproco: ¿podremos "remontarnos hasta la fuente" y conocer la forma de una superficie a partir de su espectro de vibración? El primero en plantear esta cuestión fue Marc Kac (matemático estadounidense de origen polaco), quien la propuso en 1966 en la forma siguiente: "Can one hear the shape of a drum?" (¿Es audible la forma de un tambor?), vale decir, "¿Podemos determinar la forma del tambor a partir del espectro de frecuencias?"

Tras largo recorrido, a esta pregunta le dieron por fin respuesta teórica en 1992 los matemáticos estadounidenses C. Gordon, D. Webb y S. Wolpert. Y es un lapidario "No". (Asunto del que se ocupó Ian Stewart en la sección *Juegos matemáticos* de noviembre de 1992.)

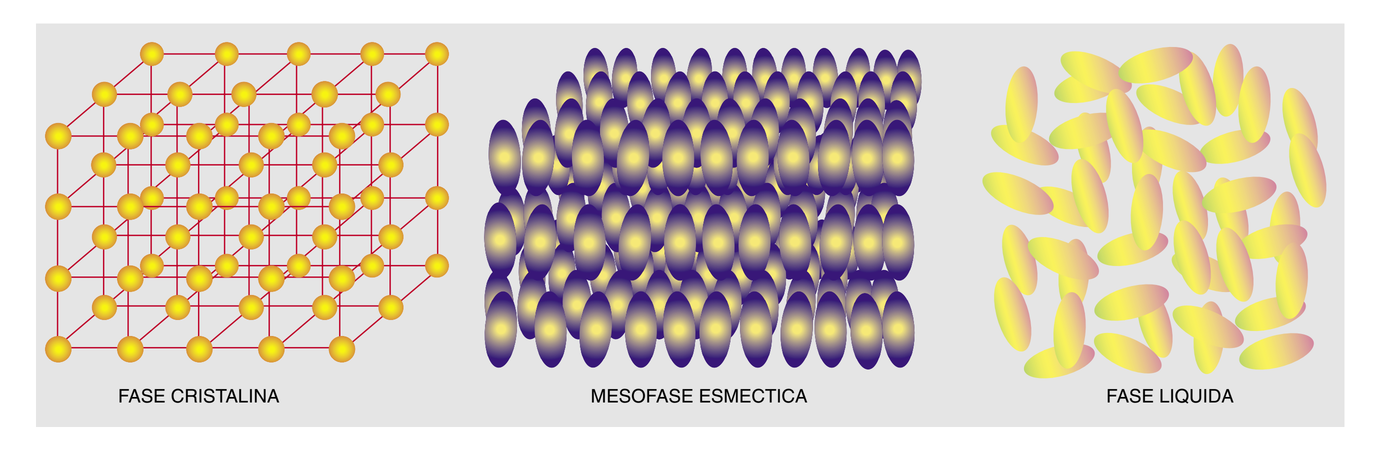
Veremos en este artículo que el análisis de las vibraciones de una fina película de cristal líquido, que se aproxima mucho a un tambor ideal, confirma el análisis matemático.

Los cristales líquidos

Todos conocemos los tres estados ordinarios de la materia: sólido, líquido y gaseoso. Ciertas sustancias presentan, sin embargo, estados intermedios en los que sus moléculas quedan dispuestas en estructuras que comparten propiedades de líquido y de sólido cristalino. Dichos estados fueron descubiertos a finales del siglo XIX por el biólogo M. Reinitzer. Georges Friedel los bautizó después como "mesofases" en 1921.

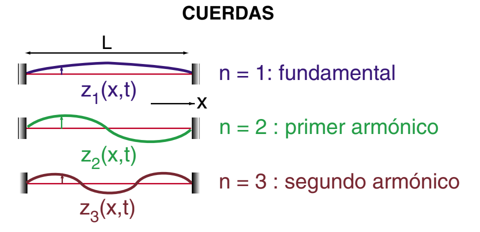
¿Qué propiedades moleculares específicas son las que permiten la formación de mesofases? La respuesta es que las moléculas suelen tener una estructura muy complicada, constando de varias piezas enlazadas químicamente. Algunas, por ejemplo, están formadas por un "núcleo" rígido y una "cola" flexible. Si estas dos piezas constituyeran moléculas separadas, sus temperaturas de transición sólido-líquido serían diferentes. En el caso de la molécula compuesta de dos piezas existe, pues, un intervalo de temperatura en el cual el núcleo "quiere" hallarse en estado cristalino y la cola en estado líquido. La competición entre ambas conduce a la formación de una mesofase en cierta gama de temperaturas.

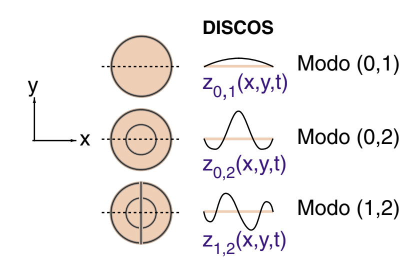
Otra de las denominaciones de las mesofases es la de "crista-



1. LA MESOFASE ESMECTICA posee una estructura intermedia entre los estados sólido y líquido.

Modos de vibración





La cuerda y el disco se encuentran en posición horizontal cuando están en reposo. Las formas vibrantes mostradas corresponden a "instantáneas" de la cuerda o de la membrana en un instante dado. A cada dibujo le corresponde un "modo" posible de vibración en el caso de la cuerda. Un "nodo" es un punto que permanece inmóvil en el transcurso del tiempo: los dos extremos de la cuerda, al igual que el perímetro del disco, constituyen nodos, cualquiera que sea el modo. Un modo queda entonces caracterizado por el número de nodos, o de líneas nodales, que comporta. Los diferentes modos de vibración de una cuerda se clasifican por número creciente de nodos interiores: el modo fundamental carece de ellos; el primer armónico tiene uno, el segundo, dos, etc. Tenemos, pues, una infinidad de modos posibles. Otro tanto les ocurre a los discos, en los cuales las vibraciones modifican las dos dimensiones de la superficie plana. Los modos de una superficie se caracterizan por dos números.

En la práctica, durante la vibración de una cuerda o de un disco, se produce la superposición de varios modos.

les líquidos". Adoptado por razones históricas, tal nombre expresa igualmente el carácter intermedio de las mesofases. La denominación "cristal líquido" es más habitual, y la utilizaremos en lo sucesivo, a pesar de que pueda inducir a confusiones: un cristal líquido no presenta nunca un aspecto cristalino, sino, por el contrario, el de un líquido muy viscoso.

Nos interesan sobre todo los cristales líquidos llamados "esmécticos", que se caracterizan por la organización de sus moléculas en capas. En las mesofases de este tipo el orden cristalino se conserva al menos en una dirección.

Merced a su estructura laminar, los cristales líquidos esmécticos forman películas al extenderlos sobre un bastidor de cualquier forma, por quedar las capas esmécticas paralelas a la superficie de la película. Estas películas se asemejan a las pompas de jabón, con una sola diferencia: una pompa tiene siempre dos capas de moléculas de jabón, con el agua en el medio, mientras que las películas esmécticas están constituidas exclusivamente por moléculas de cristal líquido y pueden hallarse compuestas por un número arbitrario de capas, lo que las hace mucho más estables.

Las películas esmécticas quedan conectadas al bastidor que las soporta por un menisco, que es una sucesión de capas cada vez más espesas. En general, el tamaño del menisco es despreciable con respecto a las dimensiones de la película propiamente dicha.

Ya tendida, la película no flamea como una bandera al viento, sino que permanece plana como el parche de un tambor. Tal comportamiento indica la presencia de una cierta tensión en ella. Sin embargo, en el caso de una película esméctica y contrariamente a lo que ocurre con las cuerdas de un instrumento musical, la tensión existente es intrínseca; la tensión de una cuerda, en cambio, puede ser regulada, por ejemplo, haciendo girar una llave.

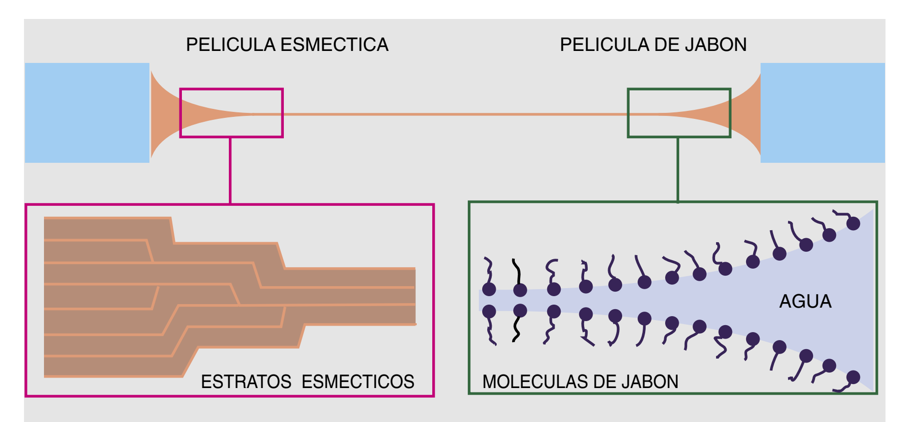
Las películas esmécticas son membranas ideales

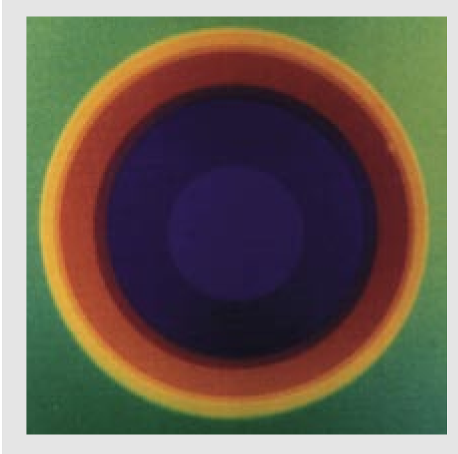
Los espesores de una película esméctica están comprendidos entre unos pocos estratos moleculares y varios centenares de ellos, es decir, un espesor máximo de algunos centenares de nanómetros; dicho tamaño es muchísimo menor que sus dimensiones laterales, que son del orden de centímetros. Podemos, en consecuencia, despreciar su espesor, es decir, considerar la película como un sistema bidimensional; por si fuera poco, la tensión de la membrana es además uniforme.

Estas dos propiedades confieren a las películas esmécticas el carácter de membranas ideales, mejores incluso que el parche tenso de un tambor. En efecto, resulta muy difícil lograr que al tensar el parche de un tambor la tensión sea perfectamente uniforme. Es, pues, muy cómodo utilizar como membrana vibrante una película esméctica.

Antes de estudiar las vibraciones de una película esméctica vamos a examinar el caso de la cuerda vibrante, que constituye un sistema unidimensional. En el dibujo del primer recuadro hemos representado las posiciones de una cuerda en equilibrio (horizontal) y en un instante cualquiera de su vibración.

Admitiendo ciertas aproximaciones (vibraciones de amplitud suficientemente pequeña) se puede considerar que la trayectoria descrita por un punto de la cuerda es vertical; en consecuencia, el pequeño segmento de cuerda considerado "vibra" en el transcurso del tiempo en torno a su posición de equilibrio (horizontal). Desde su punto de vista experimenta dos fuerzas que se compensan. Está, por una parte, su propia fuerza de inercia (debida a su movimiento); por otra parte, está sometido por el resto de la cuerda a una fuerza, llamada "antagonista", que tiende a arrastrarlo hacia su posición de equilibrio. Esta fuerza antagonista se debe a la existencia de tensión en la cuerda, que se opone a las eventuales deformaciones que ésta pueda experimentar. La fuerza antagonista es proporcional a la curvatura de la cuerda en el punto considerado; en efecto, cuanto más curvada esté la cuerda más "ansia" tendrá de retornar a su posición de equilibrio. Para dejar el problema planteado por completo es preciso





2. COMPARACION de las películas de cristal líquido (esméctico) y de jabón. Las esmécticas son más estables, pues el agua de las películas de jabón se evapora con el tiempo y éstas se rompen, mientras que una película esméctica puede permanecer intacta varias semanas. Iluminadas con luz blanca, las regiones de diferente espesor se ven de distinto color a causa de efectos de interferencia (*véase la fotografía adjunta*). Vemos en falso color las diferencias de espesor correspondientes a estratos moleculares. El espesor de cada estrato es de tres nanómetros.

tener en cuenta que la cuerda se encuentra fija por sus dos extremos (“condiciones de contorno”): el desplazamiento de cada extremo de la cuerda es siempre nulo en el transcurso del tiempo.

Traducido a ecuaciones, este problema es siempre resoluble. La solución es una onda “estacionaria”, lo que significa que la cuerda vibra permanentemente, sin que tal vibración pueda propagarse más allá, debido a que la cuerda está fija en sus dos extremos y a que su longitud L es finita. Unicamente son posibles ciertas frecuencias de vibración: no se la puede hacer vibrar a una frecuencia cualquiera.

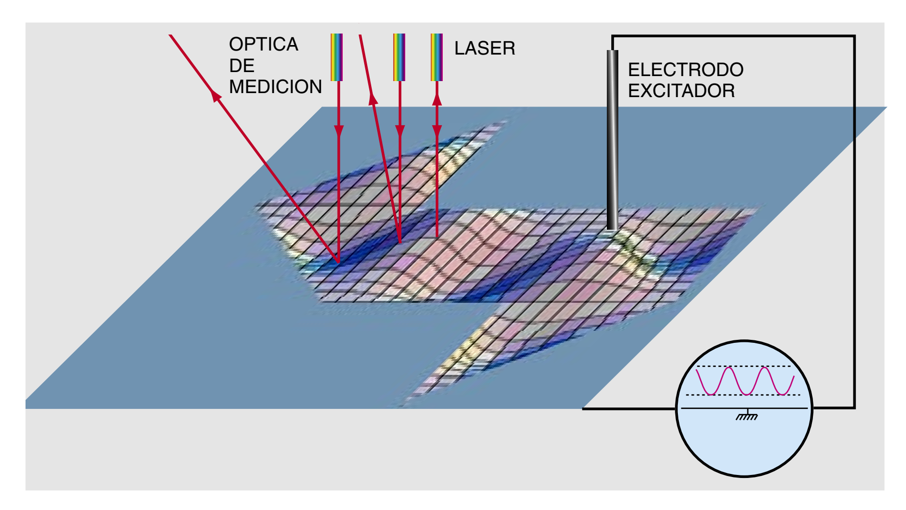
El número de tales frecuencias, llamadas “frecuencias propias”, es infinito; todas ellas son múltiplos de la frecuencia fundamental. Este fenómeno, bien conocido, sirve de fundamento a todos los instrumentos musicales que generan sonido por medio de cuerdas: piano, violín, guitarra, etc.

Observemos que el intervalo entre dos frecuencias posibles es igual a $c/2L$; si L fuera infinito, este intervalo tendería a cero y sería posible la vibración a cualquier frecuencia. Resulta así que la existencia de una secuencia bien definida de frecuencias de vibración se debe a las condiciones de contorno impuestas a los extremos de la cuerda.

Vibraciones de las superficies

Volvamos al caso de la película esméctica puesta en vibración, que constituye un sistema bidimensional. Vamos a razonar por analogía con el caso de la cuerda y veremos los límites de esta analogía. Supondremos que la película es infinitamente delgada y que su superficie es, en reposo, perfectamente plana (lo que equivale a despreciar la acción de la gravedad sobre la película). De ahora en adelante nos interesaremos por un punto concreto de la membrana. Merced al mismo tipo de aproximaciones que hicimos en el caso de la cuerda (“régimen lineal”) se supone que la trayectoria de este punto es perpendicular al plano constituido por la película en reposo. Este punto de la membrana experimenta asimismo dos fuerzas que se compensan: una fuerza de inercia y una fuerza antagonista. La fuerza antagonista se debe a la tensión de la película y es proporcional a su curvatura media. Las condiciones de contorno son que la película está ligada al bastidor por el menisco; los puntos situados “al borde” de la película no experimentan tampoco en este caso ningún desplazamiento con el transcurso del tiempo.

La solución del problema así planteado vuelve a ser una onda estacionaria: una solución correspondiente a una cierta frecuencia propia de vibración de la película. La diferencia con respecto al problema de la cuerda consiste en que el caso bidimensional es, en general, muy difícil de resolver por medios analíticos. En efecto, las condiciones de contorno, que implican una



3. DISPOSITIVOS EXCITADOR Y DETECTOR de las vibraciones de una membrana. La excitación se obtiene por medio de un electrodo. La componente continua de la diferencia de potencial atrae a las cargas de la membrana, que se acumulan bajo el electrodo. La componente alterna de la tensión ejerce entonces una fuerza electrostática sinusoidal. La detección utiliza la reflexión de un haz de láser sobre la superficie de la membrana.

cierta repartición de las frecuencias propias, dependen de la forma del marco, que puede ser más o menos complicada. En el caso de la cuerda, el único parámetro geométrico que la define es su longitud, lo que es muchísimo más sencillo.

Se sabe hallar la solución del problema para algunas formas geométricas sencillas: por ejemplo, cuando el marco es rectangular, circular o triangular. Las frecuencias propias, tanto en el caso del cuadrado como del círculo, no se encuentran espaciadas con regularidad. Cuando se oye un sonido formado por ciertas frecuencias propias del cuadrado o del círculo, el resultado no resulta armonioso, porque nuestro oído no está habituado a este tipo de escala. Todos los instrumentos musicales a base de cuerdas producen frecuencias regularmente espaciadas, por lo que cualquier sonido formado por la superposición de ciertas frecuencias propias de una cuerda nos parecerá perfectamente armonioso.

Las distribuciones de frecuencias propias no son iguales en un cuadrado y en un círculo. Resulta, pues, natural la pregunta siguiente: supuestas conocidas las frecuencias propias, ¿es posible determinar la forma de la superficie? C. Gordon, D. Webb y S. Wolpert obtuvieron una respuesta negativa, buscando y hallando un ejemplo contrario, es decir, dos contornos que tienen formas diferentes pero que poseen el mismo espectro de frecuencias propias. En razón de su forma, les hemos dado los nombres de "flecha" y "pajarita".

La comprobación experimental fue llevada a cabo por vez primera por S. Sridhar y A. Kudrolli en 1993. En su experimento utilizaron cavidades muy estrechas y planas que actuaban como resonadores de microondas, que son sistemas muy similares a las membranas vibrantes. El experimento realizado por los autores en el Laboratorio de Física del Estado Sólido en Orsay se vale de una película esméctica de cristal líquido, tendida sobre un bastidor de forma dada (que, evidentemente, fue cambiando en el curso de los experimentos).

El experimento se realizó en el vacío, por razones tanto teóricas como prácticas. En efecto, si se efectuara en el aire, también éste entraría en vibración, modificando así la vibración de la película. Además la duración de una película es mucho mayor en el vacío. El inconveniente es que, en el vacío, no podemos excitar la película mediante ondas sonoras emitidas por un altavoz. Se utiliza, pues, un dispositivo excitador eléctrico y puntual, consistente en un electrodo situado sobre la película. El sistema de detección de las vibraciones de la película es también puntual; se basa en la reflexión de un haz láser proyectado sobre ella.

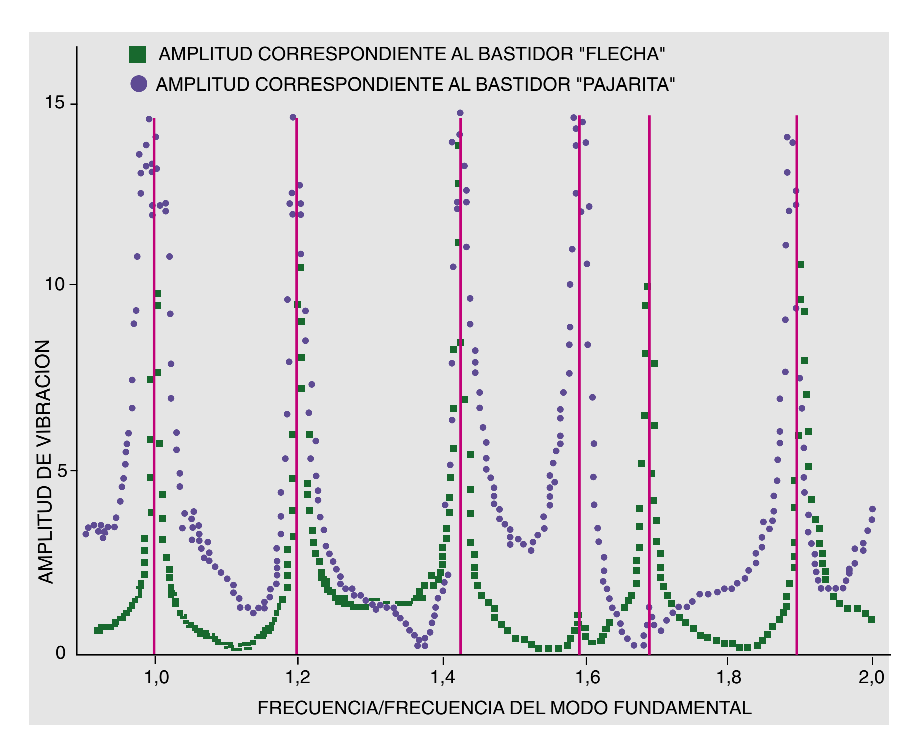
Extendimos, pues, películas sobre marcos que tenían forma de "flecha" y de "pajarita". En la figura 4 se muestra una curva obtenida experimentalmente. Vemos que las dos series de picos de amplitud (correspondientes a las frecuencias propias) asociadas a "flecha" y a "pajarita" concuerdan bien. Ciertos picos se ven muy aplastados, lo que se debe a limitaciones experimentales: el modo correspondiente ha sido mal excitado o mal detectado.

El efecto Beg-Rohu

Hemos observado, pues, el comportamiento de una película vibrante en régimen lineal, habiendo adoptado la aproximación de que las trayectorias de los puntos de la película son verticales. Ello equivale a despreciar el valor de la amplitud de vibración en comparación con las dimensiones de la película. Cuando una y otras son del mismo orden de magnitud, la película se rasga, como se rompe una cuerda demasiado tensa (no obstante, las cuerdas, por ser más rígidas, se rompen con mayor dificultad). Ahora bien ¿cuál es el comportamiento de la película vibrante en el caso intermedio, cuando la amplitud es muy pequeña, pero no despreciable con respecto a las dimensiones de la película?

En realidad, las trayectorias de los puntos de una película vibrante son siempre ligeramente curvadas, curvatura que es tanto más notable cuanto mayor sea la amplitud de la vibración. Sobre todo cuerpo que se desplace sobre una curva actúa la fuerza centrífuga, que tiende a devolverla a una trayectoria rectilínea.

MARIA BRAZOVSKAIA, CATHERINE EVEN y PAWEL PIERANSKI son investigadores del Laboratorio de Física de Sólidos, en Orsay.



4. ESTAS DOS CURVAS corresponden a bastidores en "flecha" y en "pajarita" y son resultado de los experimentos. Cada curva representa la amplitud de la desviación del haz láser reflejado en un punto dado de la película en función de la frecuencia de excitación. Las frecuencias propias de vibración son los picos de la gráfica. Vemos que las series de picos se corresponden en los dos bastidores. Sin embargo, ciertos picos de la "flecha" son demasiado romos en el caso de la "pajarita" y a la inversa. Ello se debe a que los dispositivos de excitación y de detección son de naturaleza puntual: ciertos modos resultan mal excitados, o bien la detección se efectuó en un lugar inadecuado en el caso de alguno de los nodos.

Esta fuerza se opone, por ejemplo, al efecto de la gravitación e impide que los planetas, que giran alrededor del Sol, caigan hacia él. En el caso de las películas esmécticas, tal fuerza ha sido denominada fuerza no lineal. Esta fuerza es proporcional al espesor de la película e inversamente proporcional al radio de curvatura de la trayectoria del elemento de película. Como el radio de curvatura cambia de un punto a otro, la fuerza no lineal no es homogénea. En consecuencia, si el espesor de la película no es uniforme, las regiones más gruesas son arrastradas hacia los "vientres" de la película en vibración, donde las trayectorias son menos curvas.

El interés de los experimentos que utilizan películas esmécticas está en su gran facilidad de manejo. Constituyen además membranas auténticas, sin necesidad de analogías, como ocurre en el caso de las cavidades de microondas. Además las ecuaciones que determinan las frecuencias propias de vibración son análogas a la ecuación de Schrödinger bidimensional. Consecuentemente puede "asociarse" la forma de la película en vibración con la función de onda de una partícula cuántica que evolucione en un pozo de potencial.

Los problemas tratados en este artículo se referían a películas esmécticas compuestas de capas líquidas. Hay otros tipos de mesofases, cuyas diferencias se manifiestan en la fuerza antagonista. Así que "escuchando" las vibraciones de la película puede "oírse" su estructura.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE THEORY OF SOUND. J. W. Rayleigh, Dover Publishing Inc., 1945.

AMERICAN MATHEMATICAL MONTHLY. M. Kac, vol. 73, n.º 1, 1966.

PHYSICS. A. P. Pieranski *et al.*, volumen 194, n.º 364, 1993.

YOU CAN'T HEAR THE SHAPE OF A DRUM. C. Gordon y D. Webb, en *American Scientist*, enero-febrero de 1996.

PHYSICS REVIEW LETTERS. S. Shidhar y A. Kudrolli, vol. 72, n.º 2175, 1994.

STAGE REALIZADO EN EL LABORATORIO DE FÍSICA DE SÓLIDOS. M. Albertini, J.-C. Lacouture y X. Poudret, 1996.

PHYSICS REVIEW LETTERS. M. Brazovskaia, H. Dumoulin y P. Pieranski, vol. 76, 1996.

TESIS DOCTORAL. Isabelle Kraus, Orsay, 1995.

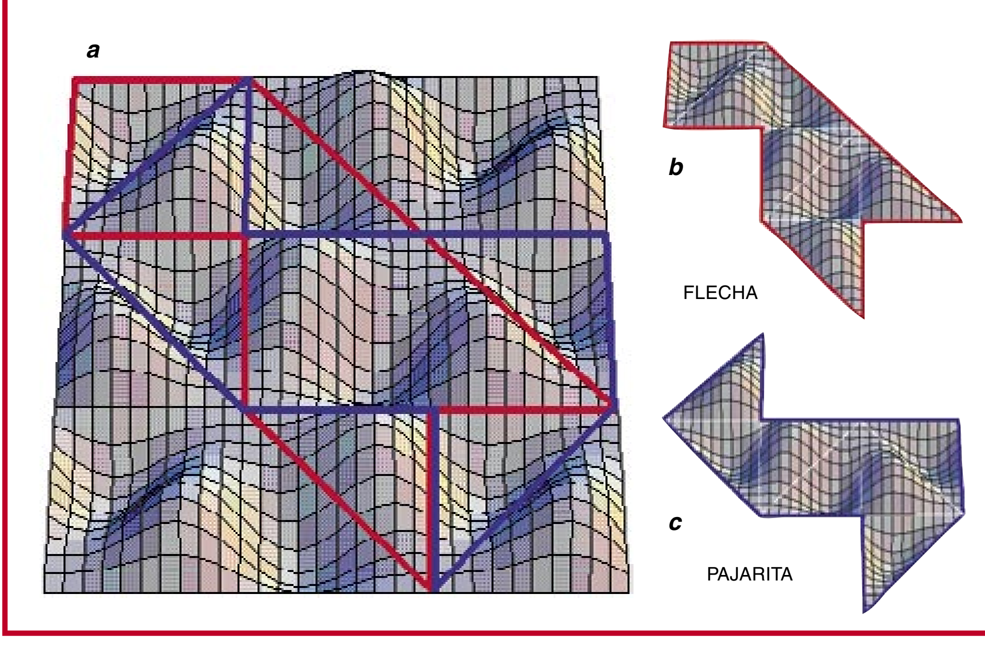
Trasplante, pajarita y flecha

El trasplante es un método matemático probatorio de que los contornos "flecha" y "pajarita" poseen las mismas frecuencias propias. A cada frecuencia de vibración de la membrana le corresponde un modo propio, es decir, la forma de la membrana correspondiente a esta frecuencia. Tal forma queda descrita por la función de onda, una función de las coordenadas del espacio y también del tiempo, que describe la forma que adopta la película en vibración.

Supongamos conocida una función de onda correspondiente a uno de los dos contornos para una cierta frecuencia *f*; vamos a construir, a partir de esta función de onda, una función de onda del segundo contorno correspondiente a esa misma frecuencia. Tomemos una función ψ de la "flecha", detenida por el pensamiento en un instante dado. ψ es por definición solución del "problema" presentado en el texto, es decir, de la ecuación que traduce el equilibrio de las fuerzas que actúan sobre un punto de la película —*ecuación de onda*— más las condiciones de contorno (ψ tiene que anularse sobre los bordes del contorno "flecha"). ¿Cómo construir, a partir de ψ, una solución φ de la ecuación de ondas para la misma frecuencia, pero con la condición de que φ se anule, esta vez, sobre el contorno de la "pajarita"? Tomemos para empezar un caso particular sencillo: tomemos el modo correspondiente a los dibujos de las figuras *a*, *b* y *c*. Los dos contornos están formados por siete triángulos que contienen cada uno un vientre en el centro; tanto la línea que separa cada par de triángulos como el contorno de la figura completa son líneas de nodos. Descompongamos la función de onda así descrita en siete fragmentos correspondientes a cada uno de los triángulos.

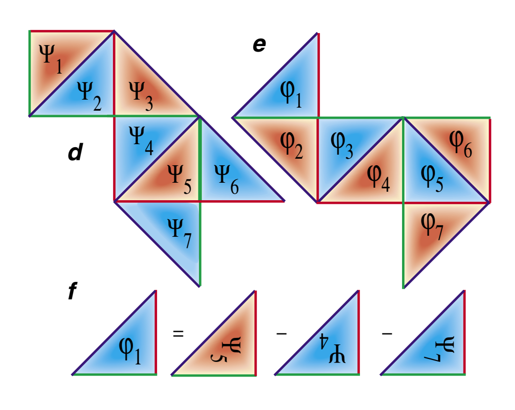
Peguemos ahora estos trozos sobre la "pajarita". Se comprueba que esta técnica no da resultado cuando intentamos pegarlos sobre un contorno en el que uno de los triángulos se encuentre al revés del que correspondería a la "pajarita". Este procedimiento funciona porque la "pajarita" y la "flecha" tienen formas adecuadas.

Podemos efectuar también este tipo de operación para otro modo de vibración de la membrana, cuyo aspecto no corresponde ya a las figuras *b* y *c*, y cuyos nodos de vibración no corresponden tampoco a las diagonales anteriormente descritas. Para lograrlo hemos de complicar un poco el juego. Recortemos ψ (que no presenta el aspecto de las



figuras *a* y *b*) en siete piezas, lo mismo que antes. La diferencia es que las líneas límites de dos triángulos a lo largo de las que se efectúa el corte ya no son *a priori* líneas de nodos. Denotemos ψ_1, ψ_2, ..., ψ_7 a las siete piezas de ψ (*véanse las figuras* d *y* e). La dificultad estriba en que ya no basta con pegar las piezas sobre la “pajarita” para obtener una función de onda para ésta. Es preciso efectuar tres “encolados”, con ciertas piezas de ψ a las que se ha dado la vuelta (de ahí la razón de los signos menos). La función φ está asimismo descompuesta en siete piezas, numeradas de 1 a 7. Resulta así que φ es igual a $\psi_5 - \psi_4 - \psi_7$ sobre el triángulo superior izquierdo, igual a $\psi_6 - \psi_3 + \psi_7$ sobre el triángulo situado justamente debajo, etc. Antes de hacer estas sumas hemos hecho coincidir los contornos de colores de los triángulos, como se indica en la figura *f*. ¿A qué se debe esto? A que tenemos que lograr que se cumplan las condiciones de contorno.

La función φ así construida ha de anularse sobre el perímetro de la “pajarita”. Fijémonos en el triángulo superior izquierdo de la “pajarita”, es decir, φ_1. Esta parte de φ tiene que anularse sobre los bordes azul y rojo del triángulo considerado. Para ver si así ocurre, volvamos a referirnos al dibujo de la “flecha”: tenemos $\psi_5 = \psi_4$ sobre el borde azul (ψ es una función continua); por consiguiente $\psi_5 - \psi = 0$; además, ψ_7 se anula sobre el borde azul y por lo tanto, $\varphi_1 = \psi_5 - \psi_4 - \psi 7$ es efectivamente nula sobre el borde azul. Sobre el borde rojo, $\psi_5 = \psi_7$ y $\psi_4 = 0$, por lo tanto φ_1 también es nula sobre este trozo del contorno. Podemos comprobar así que cada “restricción” de φ a los siete triángulos de la “pajarita” es efectivamente nula sobre el contorno.



$\varphi_1 = \psi_5 - \psi_4 - \psi_7$; $\varphi_2 = \psi_6 - \psi_3 + \psi_7$;
$\varphi_3 = \psi_5 - \psi_2 - \psi_6$; $\varphi_4 = \psi_6 - \psi_1 + \psi_4$;
$\varphi_5 = \psi_1 + \psi_3 + \psi_5$; $\varphi_6 = \psi_2 - \psi_3 + \psi_4$; $\varphi_7 = -\psi_1 + \psi_2 + \psi_7$

Ha de cumplirse, empero, una condición adicional: la función φ, lo mismo que ψ, ha de ser una función continua, especialmente en la divisoria entre dos triángulos. Su derivada también ha de ser una función continua, para asegurar un acoplamiento de pendiente “lisa” tras la operación de encolado. Verifiquemos este aspecto para φ_1 y φ_2, es decir, no sólo la igualdad de φ_1 y φ_2 a lo largo del borde verde, sino también la de sus derivadas. Sobre este borde (*véase de nuevo el dibujo de la “flecha”*), $\psi_5 = \psi_6$, $\psi_4 = \psi_3$ y $\psi_7 = 0$. La continuidad de φ al traspasar la “frontera” verde queda así garantizada, al igual que la de su derivada, debido a que ψ_7 cambia de signo en este paso, lo que “vuelve la función del revés” y asegura así la continuidad de la pendiente.

La función φ es pues adecuada: goza de las propiedades de continuidad requeridas para una función de onda, y hemos conseguido construirla a partir de una función de onda del otro contorno, para una cierta frecuencia propia *f* de este último. El hecho de que φ vibre a la misma frecuencia que ψ resulta comprensible: no hemos hecho más que superponer piezas de ψ que vibran todas a la misma frecuencia *f*. En realidad, para justificar que realmente hemos efectuado una superposición lícita, es preciso invocar un argumento de linealidad de la ecuación de onda, que hemos silenciado aquí.

El método que acabamos de describir lo inventó el matemático P. Buser, siendo otro matemático, P. Bérard, quien lo adaptó a estos dos contornos.

Kristin Leutwyler

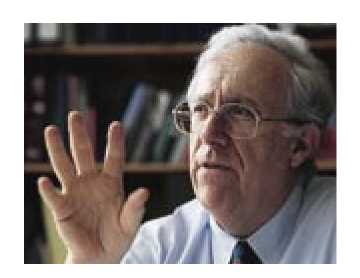
MICHAEL L. DERTOUZOS: Lo que se avecina

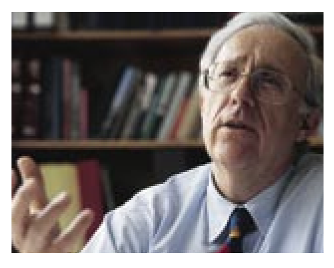
Un profesor del Laboratorio de Informática (el LCS) del Instituto Tecnológico de Massachusetts me brinda un consejo para entrevistar a su jefe, Michael L. Dertouzos: comenzar con una pregunta peliaguda. "En las reuniones de profesores es una tradición empezar por las cuestiones más difíciles", dice entre risas. "Eso le relajará." Pero no me siento con ánimos de poner a prueba el proverbial buen humor de Dertouzos. Al fin y al cabo, ¿qué podría cogerle de improviso? Como director del LCS, puesto en el que lleva 23 años, debe atender con frecuencia las consultas de algunos de los científicos, hombres de negocios y políticos más sobresalientes del mundo, la mayoría de los cuales sin duda se sentirán pequeños ante este genio de los ordenadores de dos metros de alto.

De modo que, cuando me reúno con Dertouzos al día siguiente, le pregunto las cuestiones más socorridas nada más comenzar, como la razón de que, tras escribir muchos libros que gozaron de buena acogida, como *Made in America*, que trata de las dificultades a las que se enfrenta la industria estadounidense, haya centrado su última obra, *What Will Be*, en el futuro de las técnicas de la información, un tópico tan manido ya en textos como *The Road Ahead* (de Bill Gates) que deja indiferente a muchos lectores. ¿Por qué entrar ahora en liza, menos de dos años después de que otro oráculo griego del M.I.T., Nicholas Negroponte, haya avanzado predicciones similares en *Being Digital*, que se ha vendido como rosquillas? ¿Por qué *lo que se avecina* no consiste en *digitalizarse*?

Dertouzos se arrellana en su silla y esboza una sonrisa fácil. "Este libro se ha gestado durante 20 años", me dice, y me recuerda que en 1980 profetizó un "mercado de la información" en el que la gente intercambiaría datos y servicios a través de redes de ordenadores; en suma, un avance de lo que hoy es Internet.









Dertouzos, profeta de la era informática, aboga por neutralizar la Ilustración y reunir de nuevo las ciencias y las humanidades

"Cuando presenté por primera vez mis ideas, encontré mucha resistencia", señala. "Pero ahora he rehecho mi teoría de tal modo que me parece increíblemente probable y consistente. Todo marcha. Y no encuentro eso mismo en ninguna otra parte."

Lo que sí encuentra, según me dice, son "meteduras de pata monumentales", como la de afirmar que el ciberespacio modificará la vida cotidiana de la gente. "El mundo que se avecina no es un mundo metálico, infestado de gigabytes. También antes se vislumbraba la era industrial como un 'reino del motor', ¡uuuh!", exclama, como intentando asustar. "¿Y hemos llegado al 'reino del motor'? No. ¡Vamos, hombre! Eso son paparruchas." También se rebela contra las fantasías de que los programas vayan a actuar de manera humana. A él le parece que aún quedan siglos para que lleguemos a la inteligencia artificial, si es que se llega algún día. Y, tonta o inteligente, ninguna técnica será capaz de transmitir lo que él llama las fuerzas de las cavernas: el temor, el contacto, la confianza. Piensa que, como mucho, será como ir a ver una película de terror. "Piensas: vale, aquí estoy, asústame, pero sabes que vas a salir vivito y coleando."

Fiel al sentido común de su enfoque, Dertouzos rechaza la idea de que la parafernalia de los juegos de ordenador vaya a dominar el mercado informático. "Los libros, las películas, todos los medios recreativos tradicionales representan, en su conjunto, el cinco por ciento de la economía estadounidense, mientras que la información, el trabajo de oficina, constituye el sesenta por ciento: ¡doce veces más! Pero nadie habla de eso." También piensa que las aplicaciones que no sean prácticas no sobrevivirán, como ya ocurrió en otras revoluciones socioeconómicas. "Tengo la convicción de que esta revolución acabará hacia finales del siglo XXI, que para entonces la productividad de las oficinas habrá mejorado un 300 por cien (o sea, más o menos lo mismo que con la segunda revolución industrial) y que se habrá desechado lo que no resulte útil."

Dertouzos apea a los profetas informáticos que no se avienen a considerar lo que es a la vez posible y útil. Los "tecnos", como llama en el libro a los informáticos, suelen ignorar la naturaleza humana al hacer sus predicciones. Y no es infrecuente que los "humas" —los historiadores y gente por el estilo— describan las consecuencias de las tecnicas del futuro sin entenderlas muy bien. Se exaspera tanto que le entra la risa. "Me parece que lo que realmente aporta este libro es una mezcolanza de lo que entra dentro de lo posible, gracias a las técnicas más avanzadas —que me parece que conozco bastante bien—, y el aspecto humano de la utilización de todos esos chismes. En esto último no soy un experto, pero puedo aducir que me crié en

el Rastro de Atenas, que he sufrido bombardeos, que he comido y he amado y he hecho todo lo que la gente hace.”

Y ha hecho un montón de cosas en sus sesenta años. Hijo único de un marino con grado de almirante, el joven “capitán” Dertouzos navegó por el Mediterráneo al timón de un destructor y surcó los mares en submarino. “En la marina griega las cosas se toman con bastante tranquilidad”, dice entre risas, “así que me lo pasé estupendamente y me entró el gusanillo del código Morse y de la maquinaria”. Un profesor de matemáticas consiguió interesarle en el álgebra y a resultas de un buen rapapolvo empezó a sacar sobresalientes. A los dieciséis años Dertouzos ya sabía lo que quería ser. “Leí el artículo de Claude Shannon en *Scientific American* y su trabajo sobre un ratón mecánico”, recuerda. “Me dejó tan chiflado que decidí que iba a venir al M.I.T. y que iba a ser profesor.”

“No tuve ningún problema para encontrar mi camino”, dice riéndose. “Los que sufrimos la Segunda Guerra Mundial éramos todos como unos tanques en orden de batalla, con un objetivo fijo.” La guerra fue una época difícil para la familia Dertouzos, que conoció el hambre. “Teníamos que apañárnoslas con lo que había”, cuenta. Describe, por ejemplo, cómo hirvieron unos escobones nuevos, hechos de paja de trigo, para extraer nutrientes. “La muerte planeaba. Yo jugué con explosivos”, añade, meneando la cabeza. “Dios mío, ¿cómo sobreviví a esa época? Pero la guerra fue muy instructiva.”

Una beca Fulbright lo llevó a una universidad americana de Arkansas, patria chica del senador que la financiaba. Dertouzos recuerda bien sus primeras impresiones de la Universidad de Arkansas en los montes Ozarks. Me cuenta una anécdota: “Unos jugadores de fútbol americano estaban hablando de leche, y yo me puse a hablar de política, y al final me dicen: bueno, ¿quieres o no un vaso de leche?” Pero no tuvo problemas de integración. “Y había chicas risueñas, con aquellas faldas acampanadas y aquellos calcetines blancos, que me pedían que les enseñara a bailar danzas griegas.” Tuvo que desplazarse 300 kilómetros en coche hasta donde vivía el pope griego más cercano para aprender.

Los bailes no le impidieron acabar la carrera en cuatro años. Y a la edad de 21, con algunas invenciones en su haber, como la de unos codificadores mecánicos, pasó a ser director de investigación y desarrollo de una subsidiaria de Baldwin Piano, que por entonces construía diales de sintonía (unos dispositivos para producir tonos puros) que tenían aplicaciones militares. Pero el M.I.T. todavía le rondaba en la cabeza, de modo que pocos años más tarde solicitó hacer un doctorado. “Fue la primera vez que tuve que agachar la cabeza desde mis años de instituto”, dice. “Pero cuando acabé mi doctorado me dieron la oportunidad de entrar en el claustro.” Siendo un joven profesor puso en marcha Computek, una pequeña compañía que construyó las primeras terminales “inteligentes”. “Simplemente les metimos un par de procesadores”, dice encogiéndose de hombros. “Pero fue en el año 1968.”

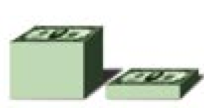
Compaginar su empresa con la carrera académica durante seis años le reportó sus satisfacciones. “Pero por excitante que sea una compañía, en realidad lo que se hace es maximizar la diferencia entre dos cifras: el debe y el haber”, dice. “Yo buscaba algo más.” De modo que vendió Computek en 1974 y ese mismo año se convirtió en el director del LCS, donde se ha hecho notar por haber impregnado el laboratorio de realismo. Victor Zue, el director asociado del laboratorio, me confía: “Le gusta emplear expresiones griegas. Una de sus favoritas, traducida libremente, reza así: ‘Intenta llegar a las estrellas con una mano, pero hurga en la tierra con la otra’, que es lo que de verdad nos pide que hagamos. Con todos los investigadores de renombre que hay aquí, es fácil estar en la luna. Pero él nos vigila de cerca.”

Dertouzos lo explica de otra manera: “Me interesa que nuestro laboratorio no haga las cosas sólo porque son excitantes. La divisa de este laboratorio es hacer que la técnica le resulte útil a la humanidad.” Los logros del LCS reflejan esa directiva: sus investigadores han creado la hoja de cálculo, la Ethernet, la computación a tiempo compartido, el sistema público de criptografía RSA y otras innovaciones de talla no pequeña. Actualmente el LCS coordina el World Wide Web Consortium, un grupo de 160 organizaciones con Tim Berners-Lee (que pertenece al LCS y es el inventor de la telaraña mundial) a la cabeza. El grupo pugna por mantener la red dentro de unas normas, en la medida de lo posible. Son tareas que no atraen tanto la atención

Cinco mitos de la era informática,

según Dertouzos

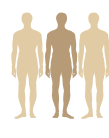
Mito 1:



Las técnicas informáticas colmarán el abismo que separa a los ricos de los pobres.

“El vacío puede salvarse, pero, dejado a sus propios recursos, el mercado informático no lo cerrará. Se necesitan esfuerzos concertados, caridad y muchas otras cosas.”

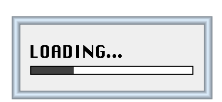
Mito 2:



Las técnicas informáticas resultarán en un capitalismo sin fricciones, en el que compradores y vendedores traten directamente.

“Crecerá el número de intermediarios. Seguirán necesitándose personajes intermedios porque lo que se compra es más que un simple producto. Se compra la confianza, la posibilidad de devolución, la de preguntar, la de encontrarlo entre la basura informática en aumento.”

Mito 3:



La revolución informática avanza tan deprisa que la mayoría de nosotros no puede seguirle el paso.

“Llevamos cuarenta años con el tema y no hemos hecho casi nada. La segunda revolución industrial duró noventa años. Así que tranquilos.”

Mito 4:

Las técnicas informáticas impondrán una cultura universal a todo el mundo.

“Son técnicas que refuerzan simultáneamente el tribalismo y la diversidad. Las fuerzas tribales son poderosas, pero cada uno de nosotros pertenece a múltiples tribus. Así que sólo desarrollaremos una leve pátina de cultura universal.”

Mito 5:



Las técnicas de la información hacen necesarias nuevas leyes.

“La naturaleza humana es inmutable. Los ángeles y los demonios de los infocolaboradores, en el lado bueno, y de los infocriminales, en el lado malo, no están en la técnica, sino en cada uno de nosotros. La técnica sólo sirve de lente.”

como los robots humanoides que lavan las ventanas y hablan swahili, pero el servicio prestado compensa la falta de notoriedad. Como añade Zue, “Michael bromea diciendo que somos el secreto mejor guardado del M.I.T.”.

Dertouzos señala enseguida en su libro que, dejando de lado lo anecdótico, adaptar la técnica a las necesidades humanas reporta además beneficios económicos. “En el mundo de la oficina, yo, Michael, veo actualmente cosas increíblemente ineficaces, inauditas, inconcebibles, comparables a las que se sufrían antes de la era industrial, cuando todavía se excavaba con pico y pala.”

El problema, explica, es que todavía no hemos dominado las “excavadoras electrónicas”, los aparatos que puedan hacerse cargo de las tareas mentales, de la misma manera que las excavadoras de verdad sustituyeron el trabajo físico. Señala que normalizar los formularios electrónicos de tal manera que un ordenador pueda gestionar, por poner un caso, las reservas de unas líneas aéreas, podría mejorar la eficacia en un seis mil por cien. Los fabricantes de programas informáticos sólo tendrían que ponerse de acuerdo en el significado de un pequeño conjunto de palabras: número, fecha, de, a, disponible, comprendido, reserva y confirmado. Se tardan diez segundos en decirle a un ordenador que uno quiere ir a Londres el lunes o el martes que viene, mientras que rellenar la solicitud, esperar la respuesta y todo lo demás puede llevar diez minutos.

“Me sacan de quicio mis colegas técnicos cuando dicen: ‘No me líes con las aplicaciones, vamos a seguir con la ciencia’. Se cometió un gran error hace tres siglos cuando se separaron la técnica y las humanidades”, afirma, dando dos palmadas como quien se quita algo de encima. “Allá ellos con la Ilustración. Ya es hora de juntarlas de nuevo.”

Hay que contar con que llevará algún tiempo, un siglo según las estimaciones de Dertouzos. Pero él se ocupa de iniciar a los nuevos miembros del claustro del LCS en su manera de ver las cosas: “Les digo que la pura inteligencia no me impresiona. El trabajo en equipo, las cuestiones relacionadas con el carácter y la amabilidad son lo que me indica lo que alguien puede hacer por la humanidad.” O sea, que las cuestiones más difíciles se preguntan al comienzo.

La simetría como destino

Un enfoque ponderado del cociente intelectual

Puede que el origen de ciertos influjos del ambiente sobre la inteligencia sea la vulnerabilidad genética que se produce durante el desarrollo. Si se relaciona esto con el hecho de que la heredabilidad del cociente intelectual (CI) no cambia con la edad, puede que haya que dejar de considerar como opuestos a los factores naturales y a los educativos.

El estudio de la inteligencia humana ha tenido siempre los pies en la biología y la cabeza en las nubes. El reciente enfrentamiento de Gary Kasparov con 'Deeper Blue' ha permitido ver lo que puede lograrse cuando se confronta la inteligencia humana con otros métodos que no es creíble que lleguen a imitar nunca del todo sus procesos cognitivos. Dos estudios situados al otro extremo del espectro nos recuerdan que la inteligencia se basa en la carne y no en el silicio.

Uno de ellos, realizado con mellizos octogenarios suecos, llega a la conclusión de que la parte heredable de la inteligencia psicométrica sigue siendo casi igual en la vejez que en la juventud. El segundo estudio demuestra que hay una modesta pero repetida asociación entre el CI y la asimetría en los rasgos bilaterales del cuerpo humano. Entre ambos llevan a conclusiones bastante paradójicas, al poner en relación las influencias ambientales con la base genética de las diferencias de CI.

Las investigaciones sobre la heredabilidad y los correlatos biológicos de la inteligencia experimental tienden, por desgracia, a sumirse en una especie de calvinismo cognoscitivo. Las estimaciones que se hacen de la heredabilidad se disfrazan de constantes de la naturaleza, domina el pesimismo social y los interesados se resignan a admitir una predestinación debida a genes desconocidos. Como hace mucho tiempo que se dispone de pruebas de que el CI es heredable, la idea de que tiene que haber genes de la inteligencia se impuso como una consecuencia lógica, como ahora circulan teorías de que puede que haya genes de la homosexualidad. Por descontado que las ideas sobre la heredabilidad de la inteligencia son muy anteriores a la noción de gen y se remontan seguramente hasta Francis Galton.

Se ha comprobado que las proporciones de heredabilidad del CI entre los octogenarios son muy parecidas a las de grupos de edades más jóvenes (del orden de 0,60). El que esto resulte sorprendente se debe a que parece de sentido común que, con el paso del tiempo, la experiencia fuese teniendo cada vez más importancia en la determinación de las habilidades cognoscitivas y que, por ende, el influjo de la herencia fuese disminuyendo en proporción. Pero, de dar crédito al estudio sueco, las influencias del ambiente sobre el CI empiezan a producir sus efectos desde muy pronto. Esto no es difícil de aceptar; de hecho hay factores potenciales cuya influencia es biológica más que estrictamente psicológica (como el plomo atmosférico, la nutrición materna o el síndrome de alcoholismo fetal) y que suelen actuar siempre en los primeros estadios de la vida.

Por desgracia, el contar con estimaciones relativamente fiables de la heredabilidad del CI no nos sirve de mucho. Como carecemos de sistemas prácticos para medir la variabilidad de los ambientes y la de las influencias genéticas, nos las hemos de haber con una relación entre dos incógnitas. Por eso no pueden deducirse otras conclusiones que las de cariz sociopolítico: la heredabilidad del CI es tan grande (o tan pequeña) que los programas educativos y sociales tendrán unos efectos insignificantes (o enormes).

El problema es que hay tres líneas de opinión respecto a cómo interpretar el puro dato empírico de que la capacidad intelectual varía mucho. Quienes tienen la cabeza en las nubes —los que investigan la inteligencia artificial y los que construyen pruebas psicométricas— se atienen a los resultados. La inteligencia consiste en el desempeño con éxito de tareas difíciles y en resolver situaciones en las que inicialmente no se sabía qué hacer. A estos 'idealistas' les gusta ir al menos dos pasos por delante de quienes hallan soluciones algorítmicas a los problemas cognitivos. Son ellos quienes proporcionan medidas que sirven como variables críticas en los estudios de la heredabilidad y de los correlatos biológicos de la inteligencia.

El segundo grupo tiene los pies firmemente apoyados en la biología. Da por supuesto, en su forma más extrema, que no puede hacerse otra cosa que observar el determinismo biológico para luego buscar modelos sencillos que expliquen por qué la variación intelectual refleja la variación biológica. Forman parte de tales modelos las diferencias de eficacia neuronal, de rapidez de transmisión o de tasas de error. Lo único que no se puede hacer es tratar de confundir a sus partidarios insinuando la posibilidad de que haya procesos mentales que no sean estrictamente reducibles a procesos cerebrales.

Entre ambos están los colonos que vienen de la psicología cognoscitiva, que ponen de manifiesto su inseguridad llamándose 'científicos cognitivistas'. Su propósito es justificar los datos brutos de la variabilidad de la capacidad cognoscitiva, en vez de explicarlos. Suministran los algoritmos que resuelven los problemas que tienen en vilo a los del primer grupo. Llevan alrededor de veinticinco años prometiendo dar razón de la variabilidad del CI en términos de modelos de procesamiento cognoscitivo, pero todavía se esperan con impaciencia los primeros resultados positivos.

Resultados, procesos, sustrato... son los tres focos de interés que polarizan a quienes estudian actualmente la inteligencia humana. Pero en algún punto se alza la barrera de la relación mente-cerebro, una divisoria conceptual y filosófica que impide el avance. Los investigadores de la inteligencia artificial y de la psicometría pueden plantear problemas y reconocer en los resultados las marcas externas de la inteligencia, pero tienen poco que decir sobre cómo hacer más inteligentes a las personas o cómo superar los obstáculos para que desarrollen todo su potencial. Y los

cognitivistas han demostrado que ciertos problemas que antes se pensaba que requerían misteriosas facultades humanas son reducibles a algoritmos informáticos. Pero es prácticamente nula su contribución a que sepamos por qué algunas personas, y no otras, logran ver con claridad la estructura subyacente de un problema nuevo cuando se enfrentan a un montón de datos confusos. Y los deterministas biológicos pueden apelar a más de un siglo de resultados sólidos, pero no ofrecen ni una pizca de esperanza al respecto.

El estudio de la asimetría fluctuante —la asimetría de ciertos rasgos que presentan normalmente simetría bilateral, consecuencia de algún problema biológico sufrido durante el desarrollo— parece abrir un nuevo camino. La asimetría fluctuante se evalúa según un índice de variabilidad en las dimensiones de pies, dedos, muñecas, codos y orejas. Sus autores sostienen que la asimetría fluctuante presenta una correlación de entre el 0,20 y el 0,25 con la inteligencia psicométrica. Es probable que la cifra sea baja, pues si se hubiesen empleado mejores pruebas del CI y se hubiesen aplicado a una gama amplia de sujetos, y no sólo a algunos alumnos de la Universidad de Nuevo México, podrían esperarse valores de entre el 0,30 y el 0,35.

¿Cuál podría ser la causa de la asimetría fluctuante y en qué suerte de desarrollo subóptimo se podría manifestar? Los autores del estudio contemplan todas las posibilidades, incluidos los efectos sobre todos los niveles de la estructura del sistema nervioso central. Esto no es nada satisfactorio desde un punto de vista teórico, pero cuadra plenamente con la finalidad de su artículo, que es, en esencia, aportar datos.

Los autores proponen la tesis de que son las diferencias de dotación genética las causantes de que la susceptibilidad de las personas a los influjos ambientales sobre su CI sea diferente. Y consideran muy probable que los efectos se produzcan en fases muy tempranas de la vida (por ejemplo, en el período prenatal). Es decir, suponen que hay un nexo causal, real y común, entre la asimetría corporal y el CI reducido. Sostienen que entre el 17 y el 50 % de la variabilidad del CI es atribuible a tales causas. Si se comprobara que la cota máxima es correcta y repetible, la asimetría fluctuante explicaría casi todas las causas hereditarias de la variabilidad del CI. Pero cuesta mucho creer que tan prolongado enigma como el de cuáles sean las respectivas contribuciones de la naturaleza y de la cultura al CI pueda quedar reducido a una ingeniosa paradoja, ya que a esto viene a equivaler el decir que la influencia del ambiente depende de la predisposición genética.

Lo que sí está claro es que el método que se ha empleado en este trabajo está al alcance de cualquier estudiante de psicología (y casi hubiera podido utilizarlo el mismísimo Francis Galton), pues no requiere más que disponer de un compás y calcular el coeficiente de la correlación producto-momento. Los autores intentan en un par de ocasiones dar explicaciones teóricas de los resultados obtenidos, entre las que se cuentan las imperfecciones del desarrollo estructural, que ocasionarían procesos neuronales menos eficaces, y el hecho de que personas que hayan sufrido grados de estrés diferentes durante su desarrollo utilizarán de modo diferente su dotación energética. Pero ninguna de ellas pasa de ser, por ahora, más que una hipótesis indicativa.

Son de esperar muchos intentos de réplica —demostraciones de que los negros, los mestizos y las razas menos favorecidas sufren más de la asimetría fluctuante que la dorada juventud de los blancos de clase media—. También es de esperar que, en general, no se reconozca que los autores de este trabajo quizá hayan atisbado un modo de acabar de una vez por todas con el ya largo antagonismo que viene enfrentando a los especialistas.

STEVE BLINKHORN
(De *Nature*)

Técnicas biológicas

Ambivalencia europea

Muchos europeos recelan de las técnicas biológicas modernas, sobre todo de las genéticas. La mayoría acepta su uso en las aplicaciones médicas "tradicionales", para diagnóstico y tratamiento, pero sólo una minoría aprueba la utilización de animales transgénicos para la investigación científica o para el trasplante de órganos a personas humanas (*véase la figura 1*). Hay además una pronunciada discrepancia entre los legisladores, tradicionalmente preocupados por los temas del riesgo y de la seguridad, y el público en general, más centrado en los aspectos morales. Estas son algunas de las conclusiones alcanzadas en la última encuesta del Eurobarómetro, realizada para averiguar qué piensa la gente de la biotecnología. La conclusión principal del sondeo es que no puede darse por sentado que el público confíe en las nuevas aplicaciones de las técnicas biológicas.

Se supone habitualmente que el saber es un factor decisivo para que haya una actitud favorable a la ciencia y a la técnica: cuanto más informado esté el público, mayor será su apoyo. Si comparamos la nueva encuesta del Eurobarómetro (la de 1996) con análisis anteriores realizados en 1993 y en 1991, resulta que, si bien ha aumentado ligeramente el conocimiento que tiene el público de la biología básica en cuestión, la verdad es que han disminuido las expectativas respecto a la contribución que puedan prestar la biotecnología y la ingeniería genética a la mejora del nivel de vida. La nueva encuesta pone además de manifiesto que el grado de conocimiento no se relaciona mucho con la aceptación de todas las aplicaciones a que se refiere la figura 1.

Resulta, pues, que el mayor conocimiento no conduce necesariamente a una mayor aceptación del público, como ya tuvieron ocasión de descubrir otras industrias, así la nuclear, que intentaron aplicar técnicas controvertidas. Por lo que se refiere a las técnicas biológicas, la situación es más compleja. El nuevo sondeo revela, por ejemplo, que quienes poseen mayores conocimientos es más probable que tengan una opinión definida sobre ellas; pero esta opinión puede ser positiva o negativa. Se ha insinuado que la causa de la resistencia del público a las nuevas técnicas sería el "desequilibrio" existente entre las valoraciones científicas y las profanas del riesgo. Aunque algunos debates públicos sobre determinados aspectos de las técnicas biológicas se hayan polarizado hacia el tema del riesgo, en otros han prevalecido las consideraciones morales. La figura 1 muestra que la gente considera que las aplicaciones biotecnológicas son potencialmente útiles, a pesar de lo cual piensa que las relativas al cultivo de plantas, a la producción de alimentos y al uso de animales transgénicos para la investigación y los xenotrasplantes (trasplantes de órganos entre especies) implican un gran riesgo, aunque sólo este último

tema llega a considerarse moralmente inaceptable. Esto podría hacer pensar que hubiese una gran relación entre la utilidad, el riesgo y la aceptación moral, por una parte, y los niveles generales de apoyo a técnicas biológicas específicas, por otra.

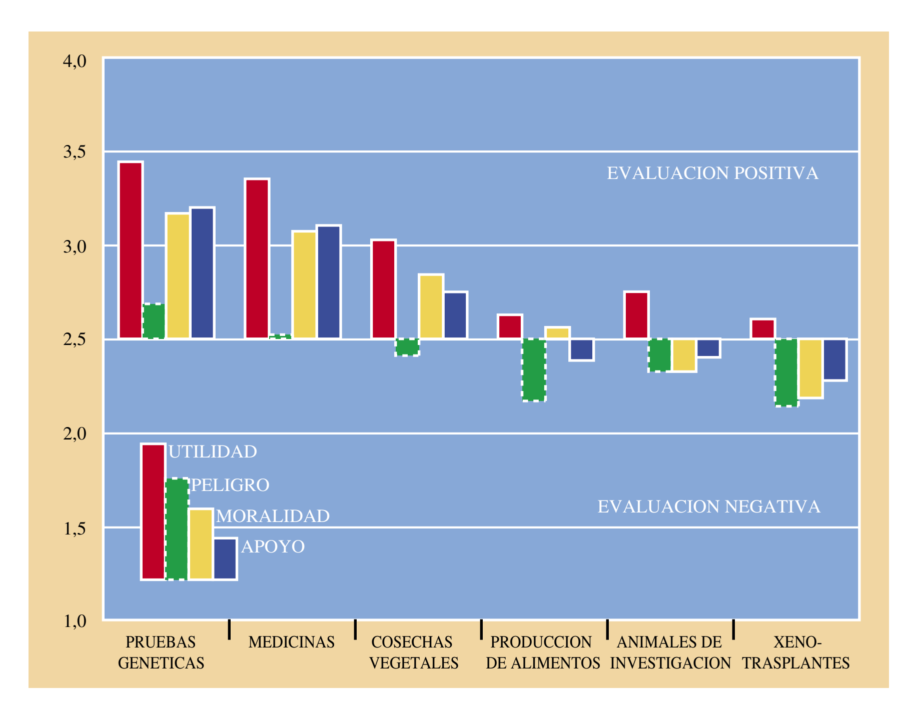
Los análisis de regresión múltiple revelan que los índices de aceptación moral y de utilidad son indicadores directos del grado de apoyo, medidos por la aprobación, (aceptación moral, B promedio = 0,54; utilidad, B promedio = 0,35, siendo B el factor del grado de asociación), mientras que el valor predictivo del riesgo sería mínimo (B promedio = 0,04). El único caso en el que los riesgos percibidos resultan un índice significativo del apoyo es el de la producción de alimentos. Los rasgos generales de los resultados referentes a los seis aspectos mostrados en la figura 1 inducen a pensar en la siguiente recapitulación de cómo actúan la utilidad, el riesgo y la moralidad a la hora de condicionar la aceptación. Primero, la utilidad es un requisito ineludible; segundo, el público parece dispuesto a aceptar ciertos riesgos siempre que se perciba una utilidad y no haya problemas morales; tercero, pero decisivo: los escrúpulos morales se anteponen a los criterios sobre la utilidad y el riesgo y funcionan a modo de veto.

Que el público conceda mayor importancia a los aspectos morales que al riesgo a la hora de tomar posición respecto de las técnicas biológicas es algo que se repite en todos los países miembros de la Unión Europea y para todas las aplicaciones consideradas. Esto tiene importantes repercusiones sobre la elaboración de planes generales de actuación. Los debates políticos sobre la biotecnología se han centrado en los daños potenciales que pudieran causarse al medio ambiente o a la salud, pero, si a la gente le preocupan más las consideraciones morales, es improbable que esta preocupación disminuya por el mero hecho de que se den garantías de tipo técnico o por proyectos legislativos orientados a reglamentar y evitar los riesgos.

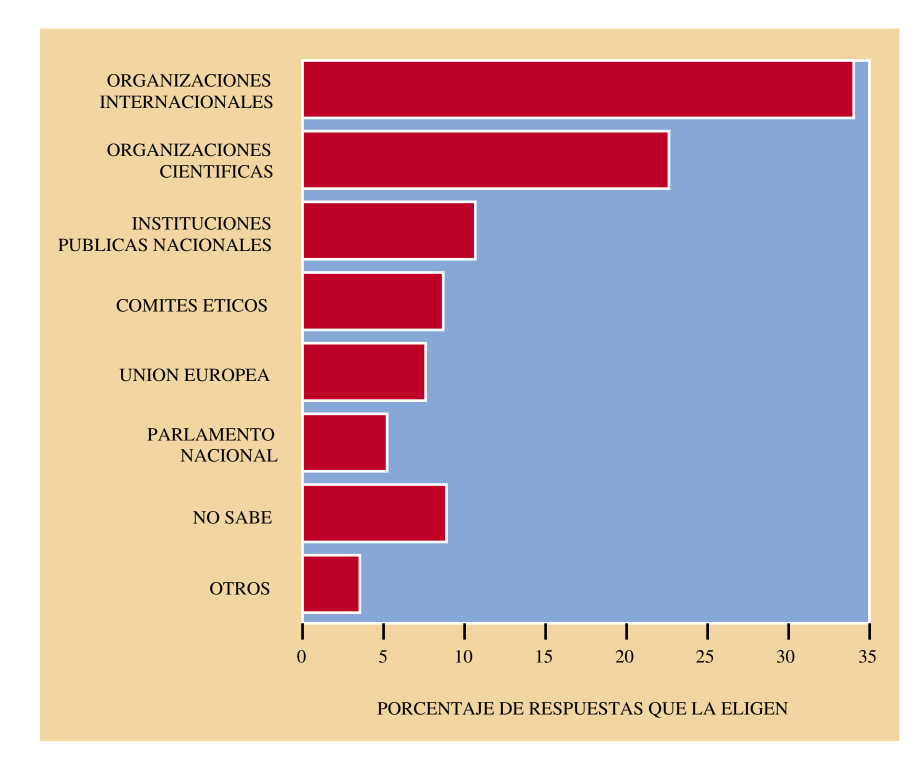
Si las técnicas de la biología moderna se encuentran tan reguladas en Europa es precisamente por cuestiones de riesgo y de seguridad. Como parte de la encuesta se preguntó qué instituciones se consideraban más idóneas para establecer la regulación (*figura 2*). La mayoría de los europeos prefiere que lo hagan organismos internacionales, como las Naciones Unidas o la Organización Mundial de la Salud, y no sus propias instituciones, ya sean puramente nacionales o de ámbito europeo. También se ve con buenos ojos que la reglamentación la hicieran las instituciones científicas. Estos resultados confirman la tendencia, ya detectada en otras ocasiones, de una creciente desconfianza hacia las instituciones políticas nacionales. También demuestran que se considera que las repercusiones de la biotecnología tienen un alcance transnacional, que desborda las competencias de las instituciones nacionales.

El sondeo indica que puede que la preocupación pública se deba a desconfianza. Por ejemplo, el 74 % de los consultados considera que los alimentos modificados genéticamente deberían estar etiquetados; el 60 % cree que deberían celebrarse consultas públicas sobre los avances de las técnicas biológicas; el 53 % piensa que la reglamentación actual es insuficiente para proteger a la gente de los riesgos que tales técnicas implican; y el 39 % considera que las autoridades religiosas deberían participar en el proceso reglamentador. Para que los especialistas y los legisladores industriales se ganen la confianza del público tienen que hacer de la claridad y de la consulta pública una parte esencial del proceso regulador.

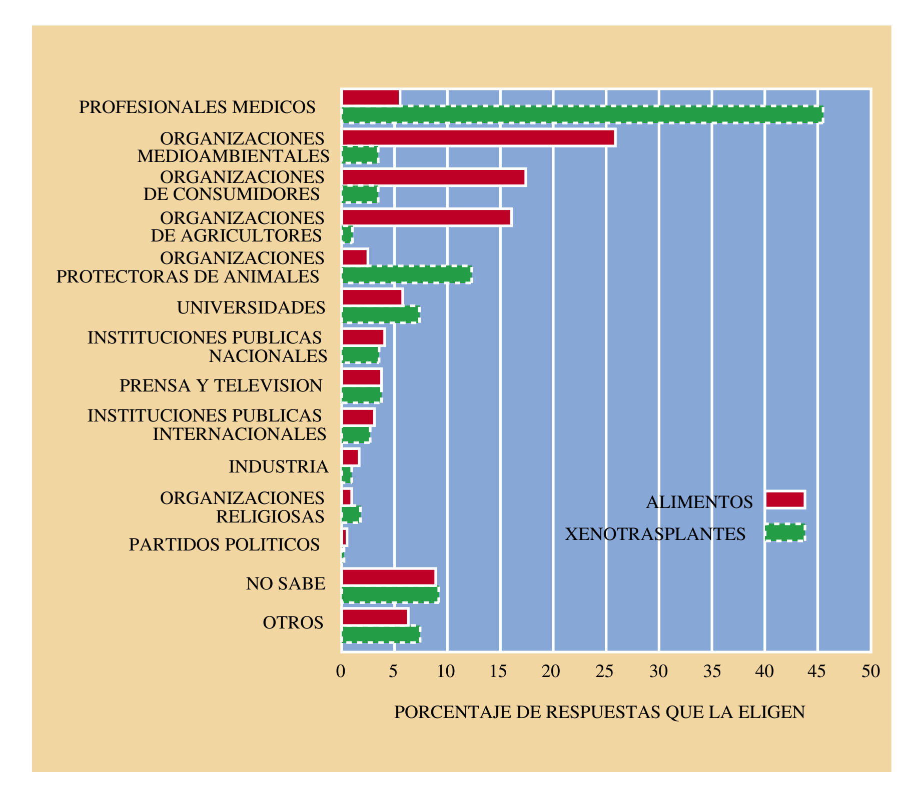
¿Discrimina la gente entre las distintas fuentes de información según los temas? Se pidió a los consultados que seleccionasen la institución que



1. La forma en que se perciben la utilidad, el riesgo y la moralidad son factores de la aceptación pública. Se preguntó a los encuestados si consideraban que las seis técnicas biológicas indicadas eran beneficiosas (rojo)*, peligrosas* (verde)*, moralmente aceptables* (amarillo) *y si debían fomentarse* (azul)*. Los valores medios europeos se ofrecen en una escala de cuatro puntos, en la que 2,5 significa "neutralidad". Pruebas genéticas significa su utilización para detectar enfermedades heredables, como pudiera ser la fibrosis quística. Medicinas significa la introducción de genes humanos en bacterias para producir medicamentos o vacunas, como sería la producción de insulina para los diabéticos. Cosechas vegetales se refiere a la transferencia de genes de unas plantas a otras cultivables para aumentar su resistencia a las plagas de insectos. Producción alimentaria incluye la utilización de las técnicas biológicas actuales para la producción de alimentos; por ejemplo para aumentar su contenido proteico, hacerlos más duraderos o modificar su sabor. Investigación animal alude a la generación de animales genéticamente modificados para las investigaciones de laboratorio, como serían los ratones que tienen genes cancerígenos. Como se explica en otro lugar de este número, los xenotrasplantes consisten en la introducción de genes humananos en determinados animales para obtener de ellos órganos utilizables en los trasplantes*



2. ¿Quién debe regular las técnicas biológicas? Se preguntó a los encuestados qué institución consideraban más idónea para hacerlo de entre varias posibles



3. ¿En quién puede confiarse para que nos diga la verdad sobre las técnicas biológicas? Se preguntó cuál de las instituciones de la lista era la que inspiraba mayor confianza a la hora de obtener información verdadera sobre las cosechas de alimentos modificados genéticamente (rojo) *o la introducción de genes humanos en animales para la producción de órganos para trasplantes* (verde)

considerasen más idónea y fiable en relación con dos temas actuales de técnica biológica (*véase la figura 3*). En el caso de las cosechas modificadas genéticamente, la mayor confianza se depositó en las organizaciones medioambientales, mientras que para los xenotrasplantes se decantaron por los médicos. Por tanto, la gente sí que discrimina entre las fuentes de información y la confianza que presta depende claramente del asunto. La profesión médica sigue siendo una de las instituciones que genera mayor confianza dentro de su ámbito de competencias, como les sucede en el suyo, aunque en menor grado, a las organizaciones medioambientales. Las instituciones políticas nacionales no gozan de mucha estima.

Se ha dicho que la confianza es un sustituto funcional del conocimiento en un mundo de complejidad creciente. La falta de confianza puede tener una gran influencia en la manera de analizar los temas, sobre todo en situaciones de gran incertidumbre. Cuando no hay confianza, proliferan y se acrecientan los riesgos potenciales y los peligros morales. En los tres sectores principales examinados (el médico, el agrícola y el de la experimentación animal), quienes manifiestan confianza en las instituciones públicas tienden también a mostrar opiniones sistemáticamente más positivas: es más probable que digan que hay que fomentar la biotecnología, que se la puede considerar moralmente aceptable y que su riesgo puede ser llevadero. El mayor efecto del factor confianza se detecta en el apartado de las técnicas agrícolas y alimentarias, circunstancia relevante en los actuales debates públicos sobre la encefalopatía espongiforme bovina (BSE) y los alimentos modificados genéticamente.

Hasta aquí hemos considerado a Europa como una entidad única, aun cuando realmente no lo sea. Por ejemplo, en Austria ocurre lo contrario de la tendencia descrita en el párrafo precedente: quienes manifiestan confianza en las autoridades públicas son quienes tienden a oponerse a la aplicación de las nuevas técnicas biológicas a la agricultura y la alimentación. Es cierto que el gobierno austríaco se opone explícitamente a la introducción en el mercado europeo de alimentos modificados genéticamente, como la soja y el maíz. Los países en los que el apoyo a las aplicaciones examinadas es mayor son Portugal y España, seguidos de Bélgica, Finlandia y Grecia.

El menor apoyo se da en Austria y Alemania, seguidas de Dinamarca, Suecia y Luxemburgo.

Es interesante considerar algunas de las características nacionales asociadas al apoyo u oposición. En general, y con la significativa excepción de Finlandia, se observa que el público de los países favorables tiende a exhibir menores niveles de contacto y de conocimiento, así como una imagen "amenazante" y muchas expectativas. Hay también una actitud pública relativamente relajada por lo que al riesgo y a las reglamentaciones se refiere. Este sería el perfil que cabría esperar de países menos industrializados, que no poseen una industria biotecnológica desarrollada y en los que el nivel de participación ciudadana en el debate sobre estos temas es bajo.

Por el contrario, los ciudadanos de los países donde la mayoría se opone a la biotecnología tienden a poseer niveles elevados de contacto y de conocimiento, una imagen realista y unas expectativas moderadas, al tiempo que el riesgo y la reglamentación provocan mayor ansiedad pública. Este es el perfil que podría esperarse de países más industrializados y con una industria biotecnológica bien desarrollada, así como un nivel relativamente elevado de participación pública en los debates. De nuevo, sin embargo, se dan excepciones. Por ejemplo, Austria comparte un nivel de contacto grande con otro reducido de conocimiento y con una imagen "amenazadora". (Aparte de Austria, los países en los que la población demostró mayor oposición a las técnicas biológicas fueron de los primeros en reglamentarlas.)

En definitiva, se diría que algunos de los países de la Unión Europea en los que la biotecnología está más asentada son los menos favorables, mientras que otros, donde la ciencia y la industria se hallan en su infancia, son los más favorables. Esta conclusión no es tan paradójica como pudiera parecer: la familiaridad con las técnicas biológicas existente en el primer grupo de países ha dado más ocasiones de que surja la preocupación, mientras que, en los del segundo, son las posibles consecuencias económicas lo que resulta más importante.

Pero sería ingenuo creer que las intrincadas pautas que se dan puedan explicarse de modo sencillo sin recurrir a un conocimiento más profundo de las culturas nacionales que el que pueden proporcionar los sondeos por sí mismos. Son diversos los factores que han coincidido en Austria, por ejemplo, para elevar la temperatura de los debates públicos sobre la biotecnología casi hasta el punto de ebullición, entre ellos una preocupación general por los temas ambientales, la novedad del tema y una cierta prevención hacia la integración en la Unión Europea.

Baste por el momento con la indicación de que los resultados del Eurobarómetro reflejan el tema de la "sociedad del riesgo", ya examinado por escritores como Ulrich Beck y Anthony Giddens, quienes no consideran apropiado el lenguaje de las técnicas objetivas de evaluación del riesgo, como tampoco lo hace el público europeo consultado, arguyendo que los riesgos son fundamentalmente morales y políticos. Los resultados de esta encuesta llevan a pensar que amplios sectores del público europeo mantienen una profunda ambivalencia sobre las técnicas biológicas modernas. Su foco principal sería de naturaleza moral, un conjunto de temores por los imprevisibles peligros que puedan encerrarse en un abanico de técnicas que se perciben como "no-naturales" en su conjunto.

(Este texto ha sido redactado por un equipo internacional de investigadores dentro de una acción integrada de la Comisión Europea (B104-CT95-0043), administrada por Andreas Klepsch como delegado de la XII Dirección General de la misma.)

(De *Nature*)

Petra

Arqueoastronomía y arqueotopografía

Entre el siglo II a.C. y el siglo II d.C. los árabes nabateos desarrollaron una cultura singular en la Arabia Petrea (sudeste de Siria y Palestina en la antigüedad). Durante generaciones excavaron, en los flancos de piedra arenisca de las montañas de Shera, tumbas y palacios para sus reyes y templos para sus dioses, creando uno de los lugares más fantásticos del planeta, la mítica ciudad de Petra.

Un estudio de campo preliminar llevado a cabo en algunos monumentos de la ciudad parece demostrar que varias de esas grandes obras tuvieron orientación astronómica, sugiriendo que, en este lugar, se produjo una fascinante mezcla de elementos arqueotopográficos y arqueoastronómicos.

Los nabateos poseyeron una religión naturalista, mezcla de elementos de los árabes preislámicos e influencias helenísticas, egipcias y mesorientales. Sus divinidades principales fueron Dushares ("El de Shera"), dios astral con carácter probablemente solar, y la Gran Diosa, llamada unas veces Allat ("La Diosa" con mayúsculas, y quizás identificada con la Luna) y otras Al Uzza ("La Más Poderosa", identificada con Venus en su doble papel de Estrella Matutina y Vespertina), a la que se equipara indistintamente con Istar, Astarté, Atárgatis e Isis. Según Hammond, otras divinidades importantes serían el dios Qaush, una divinidad con carácter lunar heredada de los edomitas, Harisha, una divinidad solar, la diosa Manat, hija de Dushares y espíritu guardián de la ciudad de Petra, y She'alqum, patrona de las caravanas, cuyo nombre, "Lucero de la Tribu", sugiere una relación con el Lucero del Alba o alguna otra estrella brillante significativa como Suhail (Canopo), pues ambas eran utilizadas por las caravanas para orientarse en sus viajes a través de la península Arábiga.

Los cultos a la Lluvia y a la Fertilidad (de los que era patrona Al Uzza en su manifestación como Estrella Vespertina) revestían un carácter especial, máxime en una tierra como ésta, donde el agua era un bien muy escaso. Por este motivo, no es de extrañar que una de las festividades principales, la del nacimiento del dios solar Dushares de la Gran Diosa Al Uzza, se celebrase, según san Epifanio, el día 6 de enero en Petra (25 de diciembre en Alejandría, solsticio de invierno), coincidente con la corta época de lluvias en la región donde prácticamente sólo llueve, y además torrencialmente, los meses de diciembre y enero.

De los varios altares y cientos de edificios excavados en la roca, se trabajó en los más singulares bien por su tamaño, su especial significación o su localización. Para nuestra sorpresa, casi la totalidad de las construcciones estudiadas ofrecieron resultados muy prometedores e interesantes.

En el flanco occidental de la mole rocosa del Yebel al Jubza, que cierra la ciudad por el este, se encuentran las "tumbas reales" (de la Urna,

de Seda, Corintia, del Palacio) de las que sólo a la primera se le ha asignado un ocupante, el rey Malico II (40-70 d.C.). Curiosamente, todas ellas se labraron de forma que, desde el interior, su puerta principal de acceso enmarcaba la montaña sagrada de Umm al Biyara situada enfrente, al otro lado del valle en que se extendía la ciudad. Esta montaña revestía un carácter especial para los nabateos al ser su fuente principal de abastecimiento de agua. Otro dato interesante es que, de todo el flanco rocoso disponible en la cara oeste del Yebel al Jubza, se eligió para labrar las "tumbas reales" aquel sector desde el que se divisaba el ocaso solar en los equinoccios sobre la cumbre amesetada de Umm al Biyara. Antes vimos la importancia del solsticio de invierno (o fechas cercanas a éste) como momento del nacimiento de Dushares, por lo que su "gestación" se tuvo que producir nueve meses antes, coincidiendo con el equinoccio de primavera (recordemos la Anunciación de María el 25 de marzo y la Navidad el 25 de diciembre, sin tratar de establecer ningún otro paralelismo). Por tanto, podría existir una causa de carácter religioso que justificaría la importancia de esta fecha singular y, por ende, una orientación astronómica en esa dirección.

Cerrando la ciudad por el sudeste se encuentra una montaña amesetada con dos cumbres de alturas ligeramente diferentes que recibe el nombre de Yebel al Madbah. La cumbre más baja (la meridional) fue complemente esculpida por los nabateos (o sus antecesores edomitas, según algunos autores) hasta dejar una superficie completamente llana sobre la que se levantaban dos grandes obeliscos (Azzibb Attuf o Pilares de las Mercedes) de más de seis metros de altura, asignados a las dos divinidades principales, Dushares y Al Uzza. El enorme esfuerzo que esto supuso induce a pensar que debió existir una causa importante para ello. En este sentido, se destaca el hecho de que los dos obeliscos estén orientados equinoccialmente, de forma que sólo durante el amanecer y el atardecer, de fechas muy próximas a, o coincidentes con, los dos equinoccios, la sombra de uno de los obeliscos incide sobre el otro, produciendo una singular hierofanía.

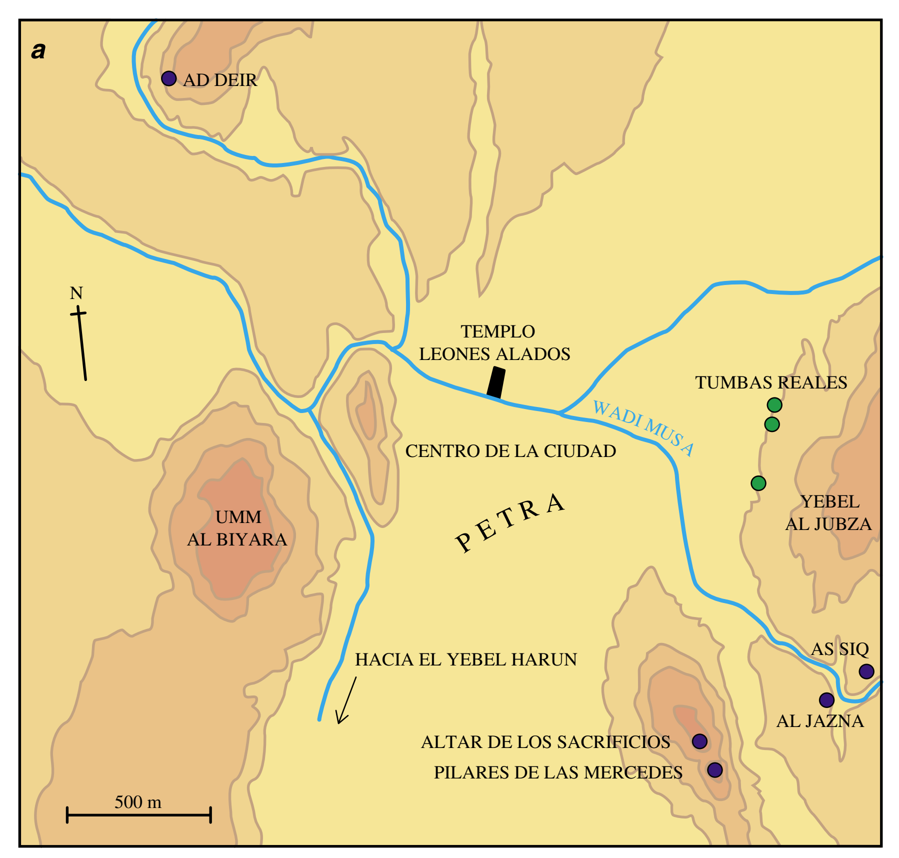
Por otra parte, sobre la segunda cumbre de esta montaña se erigió en el año 7 a.C. uno de los altares de alta montaña (Madbah) mejor conservados del mundo. Completamente excavado en la roca, posee dos altares en su lado occidental. Uno de ellos (el menor) posee una gran cazoleta de forma circular, para libaciones rituales, que lo relaciona con posibles cultos astrales y está orientado ligeramente al sur del oeste hacia las montañas de Shera. El segundo, mayor y completamente exento, está orientado de forma similar, pero en la dirección en que, a lo lejos, se divisa la cumbre del Yebel Harun, la cima más alta de las montañas de Shera, posible "morada" del dios Dushares (recordemos a Yhwh y el Monte Sinaí) y lugar importante de culto durante milenios (aquí está, según la tradición, la tumba de Aarón, hermano de Moisés). Nos encontraríamos pues ante un caso especialmente singular de arqueotopografía.

Desde el Madbah, los ocasos solares durante casi todo el año (salvo fechas próximas al solsticio de invierno) se producen sobre la cadena de Shera y, en especial, el del solsticio vernal se produce sobre Umm al Biyara, por lo que creemos que también se deben tener en cuenta posibles implicaciones arqueoastronómicas.

Al Jazna (El Tesoro) era el primer gran edificio que veían las caravanas al acceder a la ciudad a través del impresionante desfiladero del Siq. No se sabe si el edificio que ha hecho famosa a Petra es un templo o una tumba. Autores como Dalman proponen que es la tumba-templo de Aretas IV (9 a.C.–40 d.C.), dedicada a Isis-Al Uzza, Rostovzeff ha propuesto la diosa Manat, basándose en su localización en el acceso principal a la ciudad, y, siguiendo este mismo razonamiento, Browning (uno de los mayores especialistas sobre Petra) propone la diosa She'alqum. Por ello, resulta sugerente que su orientación astronómica justifique su posible uso como templo de la Gran Diosa o de su avatar She'alqum como Lucero del Alba. Sin embargo, se necesitarán mediciones más precisas de la distribución interior del monumento y de las paredes que encierran el Siq, tal como se ven desde el inte-



1. El Monasterio (Ad Deir), uno de los edificios emblemáticos de Petra de proporciones gigantescas (la urna que corona el monumento tiene más de 4 m de altura). ¿Supuesto templo de alguna divinidad nabatea o última morada de uno de sus últimos reyes? Su distribución interna, su enorme antepatio, capaz de albergar multitudes, y su singular orientación astronómica, en la dirección de la puesta de Sol en fechas próximas al solsticio de invierno, apoyan, como la más razonable, la hipótesis de que se trate de un templo





2. Mapa de Petra mostrando los principales monumentos y accidentes geográficos (a). *Localización de la ciudad en el Oriente Medio actual, dentro de las fronteras de Jordania* (b). *El reino Nabateo abarcó además territorios de los actuales Egipto, Arabia Saudí, Siria e Israel y Palestina*

rior de éste, antes de poder postular conclusiones definitivas.

En el centro de la ciudad se halla el templo de los Leones Alados. Dedicado con toda probabilidad a la diosa Al Uzza, se construyó en la década siguiente al nacimiento de Cristo con una orientación tal que, con un error de unos dos grados debido a la incertidumbre en la orografía original, su eje principal estaría dirigido al ocaso de Canopo en esa época, estrella muy importante entre los árabes preislámicos (uno de los ejes de la Kaaba se orientaba hacia su orto, mientras el otro lo hace hacía el lunasticio mayor sur), por lo que no resulta descabellado suponer que un templo de la gran diosa estuviera orientado hacia la que quizá fuese una de sus posibles manifestaciones celestes.

Al igual que ocurre en el Jazna, hay opiniones controvertidas sobre el uso en tiempos nabateos de Ad Deir (el Monasterio, véase la figura) y se ha propuesto que sería la tumba inacabada de Rabel II, su último rey. Sin embargo, en razón de su uso posterior como iglesia cristiana y su distribución interna (similar a la del Templo de los Leones Alados) y externa, Browning sentencia: “no debe existir ninguna duda de que el Deir fue un importante centro de culto para la realización de festivales, con un ascenso procesional elaborado y un vasto patio de reuniones frente a él”. Su orientación astronómica (casi diametralmente opuesta a la del Jazna) parece apoyar plenamente esta hipótesis: Ad Deir está orientado en la dirección de la puesta de astros importantes para la mitología nabatea, en fechas significativas de su calendario festivo. En este sentido, es posible que nos encontremos ante una hermosa hierofanía, producida hacia el 6 de enero a finales del S. II d.C. (fecha del “nacimiento” de Dushares de la diosa Al Uzza, según el cronista san Epifanio), por la que los rayos del Sol poniente (¿Dushares?) iluminaban por última vez la estatua de la divinidad (¿Dushares, Al Uzza, ambos a la vez?) situada en el altar del “templo”, mientras varias manifestaciones posibles de la diosa, como la Estrella Vespertina (Venus) o la Luna Nueva, “desfilaban” por la zona de cielo visible desde éste.

En resumen, nos encontramos con que tres de los “templos” más importantes de Petra podrían estar orientados en direcciones astronómicas significativas asociadas a diversas manifestaciones astrales de la Gran Diosa, lo que los coloca en relación directa con otros santuarios árabes importantes como el de la Kaaba en la Meca. En este sentido, nos parece sugerente la posible conexión hallada entre el carácter dual de Estrella Matutina y Estrella Vespertina de la Gran Diosa, en sus formas respectivas de She’alqum y Al Uzza, y dos “templos” colocados estratégicamente en los extremos oriental (Jazna) y occidental (Ad Deir) de la ciudad que, quizás, le estuvieron dedicados.

La justificación arqueotopográfica de la orientación de las Tumbas Reales y del Gran Altar de los Sacrificios, hacia Umm al Biyara y el Yebel Harun, respectivamente, constituye un ejemplo singular de fenómenos de esta índole (orientación de edificios sagrados a montañas de especial significación). Si a esto añadimos la orientación equinoccial de los dos “obeliscos” y la puesta de sol en los equinoccios sobre Umm al Biyara, tal como se observa desde las Tumbas Reales, nos encontraríamos ante un caso paradigmático de arqueotopografía y arqueoastronomía asociadas. Petra constituye, pues, un excepcional laboratorio de estudios arqueoastronómicos que esperamos desvele la mayoría de sus secretos en un futuro no muy lejano.

Juan Antonio Belmonte Avilés
Instituto Astrofísico
Canarias

De cerca

Texto y fotos: Bernard Chauvet

Parasitismo en serie

Los pulgones, al igual que la mayoría de los insectos, tienen todo un cortejo de enemigos. Figuran entre ellos los himenópteros afídinos y afelínidos, que desempeñan un papel evidente en la limitación de las poblaciones de áfidos. Con independencia de la familia a que pertenezcan, el objetivo de estos hábiles espadachines es el mismo: poner un huevo en el pulgón parasitado.

Sus métodos de aproximación son, no obstante, distintos. Los Aphidius (*abajo*), dotados de un ovipositor corto, optan por el ataque frontal: prudente palpación preliminar con las antenas, seguida de flexión completa del abdomen y estocada rápida. Los Aphelinus (*arriba, derecha*), cuyo ovipositor es más largo, tras un reconocimiento del anfitrión, dan media vuelta... e hincan su ovipositor a reculones. Dos formas de alcanzar la misma meta.

El pulgón tiene que ofrecer lecho y mantel a la larva parásita, que desarrolla su ciclo entero en el seno de su anfitrión. Poco antes de la ninfosis, la larva teje una crisálida (Aphidius) que dará al exoesqueleto del pulgón —cuidadosamente respetado— un aspecto apergaminado, momificado, devorado como está por completo en su interior (*derecha, centro*).

Este podría ser el fin de la historia. Pero ciertos parasitoides se han especializado en hiperparasitismo: se trata, de hecho, de parásitos de parásitos. Los Asaphes (*derecha, abajo*) introducen sus huevos en un pulgón momificado, previamente parasitado. Su larva efectúa su ciclo a expensas del parásito primario. ¿Será, pues, el último de la serie?... Pues no. Existen también parásitos de hiperparásitos!... ¡Otro fractal!









Fibras cuánticas de silicio

El silicio, material por excelencia en microelectrónica, podría promover una nueva revolución en optoelectrónica, al haberse descubierto que emite gran cantidad de luz cuando se prepara en estructuras porosas nanométricas

José M. Martínez-Duart, Ricardo Guerrero Lemus y José D. Moreno

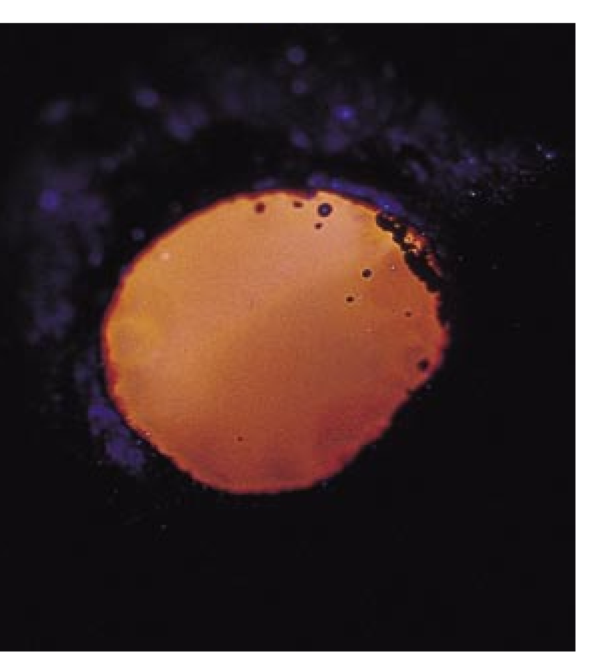
Desde hace algunos años, la investigación en nuevos materiales se viene centrando en partículas de tamaño mínimo, de escasas milmillonésimas de metro. Se busca con ello crear materiales dotados de propiedades inéditas que ofrezcan mejores prestaciones.

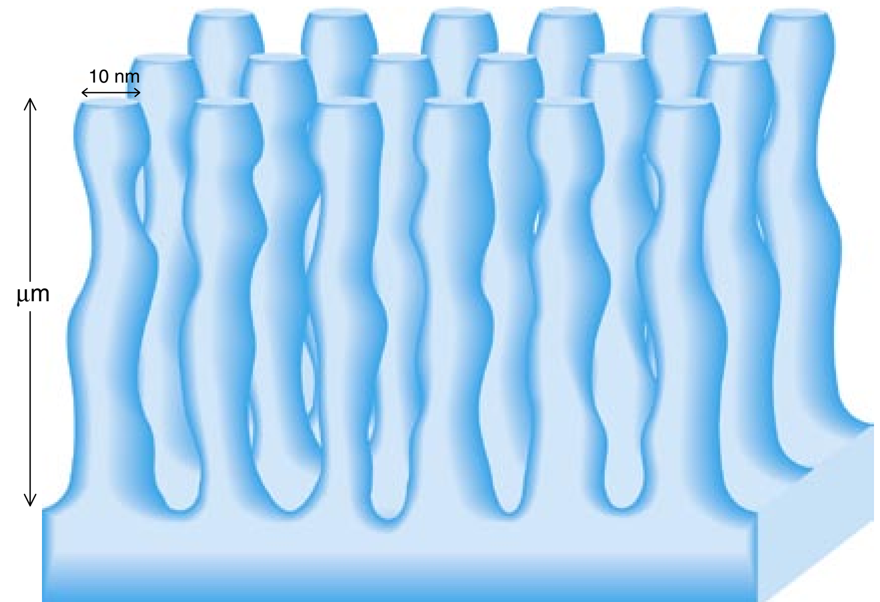
El avance registrado ya en el desarrollo de nanomateriales, así se llaman los de tamaño nanométrico, ha sido espectacular. En microelectrónica se consiguen circuitos cada vez menores, con transistores de décima de micrometro. Podemos ya fabricar materiales compuestos ("composites") en función de la aplicación deseada. Pero el control y la producción industrial de nanomateriales serían imposibles, si no se conociera qué es lo que ocurre en los niveles microscópicos. Y a eso se ha llegado con el advenimiento de sistemas de caracterización más refinados: microscopios electrónicos de alta resolución, microscopios de efecto túnel, microscopios de fuerzas atómicas y otros.

Los expertos en nanomateriales evitan recurrir a aleaciones extrañas o compuestos complejos. Las nuevas propiedades pueden hallarse escondidas en materiales muy conocidos, en el silicio, por ejemplo, con el que se fabrican más del 90 % de los circuitos integrados. El estudio microscópico del silicio ofrece, en efecto, muchas posibilidades. Lo vamos a ver a propósito de las fibras cuánticas de silicio, conocidas más popularmente con el nombre de silicio poroso.

El silicio poroso se fabrica a partir de un sustrato de silicio monocristalino. Ese sustrato, formado por una perfecta estructura cristalina de silicio, se contamina con diversos dopantes (boro o fósforo) para alterar la conductividad eléctrica del semiconductor. Las fibras cuánticas de silicio se crean a través de un proceso electroquímico en el cual, mediante transferencia de carga en condiciones adecuadas, se produce esa peculiar disolución del silicio. Se obtiene así una estructura porosa en la superficie, de unas pocas micras de espesor, cuyas fibras, compuestas por microcristales, pueden alcanzar diámetros de unos pocos nanómetros.

Aunque las fibras cuánticas de silicio miden escasos nanómetros, la alteración de su estructura cristalina acarrea la modificación de las propiedades macroscópicas del silicio. Pero eso tardó en descubrirse, pese a que las fibras cuánticas de silicio





1. EL SILICIO POROSO consiste fundamentalmente en un tipo de estructura fibrilar cuya morfología varía en razón de las condiciones de formación. Para el caso de fibras luminiscentes, la anchura de las fibras es del orden de los nanómetros y el espesor total de la capa porosa puede llegar a varios micrometros. En la imagen de la izquierda se muestra la emisión en el visible de la superficie porosa a partir de su excitación en el ultravioleta cercano.

se conocían desde finales de los años cincuenta.

Debido a su especial morfología, las fibras cuánticas de silicio se utilizaron en un comienzo para conseguir rápidas oxidaciones de láminas de silicio. Por calentamiento de las fibras en atmósfera de oxígeno se producía dióxido de silicio de forma más eficiente que partiendo de silicio monocristalino. En efecto, al ser de tipo poroso la estructura, las moléculas de oxígeno accedían antes a las capas más profundas del silicio durante la oxidación. Asimismo, se aprovecharon las cualidades aislantes del silicio poroso para fabricar circuitos integrados, lo que, a su vez, promovió el estudio del comportamiento de los parámetros que influían en su oxidación.

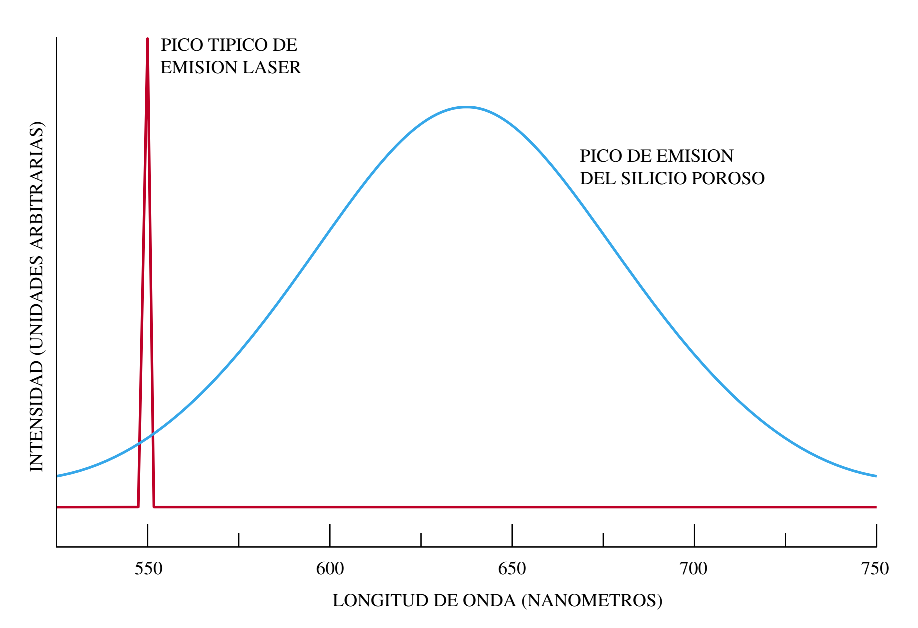
Cuando parecía que se sabía ya todo lo necesario sobre fibras cuánticas de silicio, se descubrió, a principios de los años noventa, que, bajo ciertas características de formación, adquirían fotoluminiscencia. Al incidir sobre la superficie porosa un haz de luz, a una longitud de onda determinada, la superficie de las fibras cuánticas de silicio se excita absorbiendo la energía de los fotones. Luego, a partir de la desexcitación, la superficie produce una nueva emisión de fotones con una energía más baja. Por contra, el silicio monocristalino, al ser excitado, emite en el infrarrojo y con una eficiencia luminiscente muy baja.

El fenómeno descubierto revestía un enorme interés. La emisión de luz podía producirse en la región visible del espectro, lo que permitía pensar en una posible aplicación del silicio poroso en dispositivos optoelectrónicos. Muy poco tiempo después se produjo otro hallazgo importante: las fibras cuánticas de silicio podían emitir luz visible a partir de una corriente eléctrica inyectada en su superficie. Producían el fenómeno de electroluminiscencia. Y se reforzaba así la posibilidad de utilizar las fibras cuánticas de silicio como dispositivos electroluminiscentes en optoelectrónica.

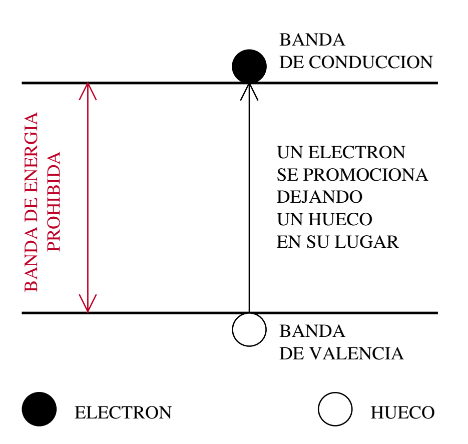
Para entender el atractivo industrial que tales posibilidades ofrecían, recuérdese que los dispositivos electroluminiscentes contenidos en un semiconductor se fabrican con materiales distintos del silicio (arseniuro de galio, por lo común). Los dispositivos electroluminiscentes deben, pues, introducirse en el semiconductor durante el proceso de fabricación. Pero nos ahorramos tal inconveniente si podemos fabricar los dispositivos a partir del mismo silicio. Por no hablar del coste: el arseniuro de galio es unas diez veces más caro que el silicio.

Las expectativas de lograr un dispositivo electroluminiscente a partir del silicio lanzaron a los investigadores a una carrera por desentrañar los mecanismos de luminiscencia de las fibras cuánticas de silicio. Se confiaba, y se sigue confiando, en conseguir que una parte de la circuitería del ordenador esté guiada por luz, donde las fibras cuánticas de silicio constituyan un dispositivo transformador de señales luminosas en eléctricas, y viceversa. Con semejante instalación, las comunicaciones dentro del ordenador multiplicarían su velocidad, pues se evitarían retrasos en tiempo producidos por los fenómenos capacitivos que se crean en los circuitos eléctricos tradicionales durante la transmisión de señales.

Para explicar la emisión de luz en las fibras cuánticas de silicio hemos de remitirnos a los efectos cuánticos inducidos por el pequeño tamaño de las mismas, es decir, a la teoría de bandas electrónicas aplicada a los semiconductores. Según esta teoría, los niveles de energía de los electrones del semiconductor se encuentran agrupados en ciertas bandas de energía separadas por intervalos



2. CUANDO SE EXCITA EL SILICIO POROSO con luz ultravioleta se produce una emisión fotoluminiscente, que halla su pico máximo en la región de luz visible del espectro electromagnético. La gran anchura del pico de emisión, si la comparamos con la de un láser, por ejemplo, se debe a la diversidad de tamaños de fibras, que contribuyen de forma distinta al fenómeno de fotoluminiscencia. Para tamaños de fibra donde se producen fenómenos cuánticos, la longitud de onda de emisión es proporcional al cuadrado del diámetro de las fibras.



3. LAS PROPIEDADES de conducción de los sólidos se caracterizan por la forma de sus bandas de energía y, en especial, por el tamaño de la zona de energía prohibida. Corresponde ésta a la energía mínima que debe tener un electrón para saltar desde la banda de valencia a la de conducción. En los materiales conductores, la banda de conducción está solapada con la banda de valencia; cualquier electrón de la banda de valencia puede moverse libremente por la red. En los semiconductores, a temperatura ambiente, existe una cierta población de electrones en la banda de conducción. En los aislantes, la banda de energías prohibidas es tan ancha, que los electrones de la banda de valencia no suelen alcanzar la banda de conducción.

("gaps"), regiones prohibidas para los electrones. En los metales no existe el intervalo, que es, sin embargo, muy grande en los aislantes.

En cualquier sólido, el comportamiento de los electrones de los niveles de energía menos enlazados con el núcleo atómico es el que más influye en las propiedades de dicho material, porque los electrones externos son los que más fácilmente se dejan influir por las perturbaciones externas. Estos niveles externos forman en los semiconductores dos bandas permitidas de energía: la banda de conducción y la banda de valencia. En la banda de conducción, los estados energéticos se encuentran sin electrones a la temperatura del cero absoluto; si el semiconductor se halla a una temperatura superior a los 0 grados kelvin, algunos electrones procedentes de la banda de valencia poseen energía térmica suficiente para saltar a la de conducción, ocupando algunos estados energéticos en la misma. La banda de conducción queda así parcialmente ocupada por electrones que contribuyen a la conducción eléctrica. En la banda de valencia los estados energéticos se encuentran totalmente ocupados por electrones a la temperatura del cero absoluto; si el semiconductor se encuentra a una temperatura superior a 0 grados kelvin, algunos electrones de la banda de valencia pasan a la de conducción, quedando aquélla parcialmente con huecos ("holes") que contribuyen a la conducción eléctrica.

Con ese marco de referencia, podemos describir el mecanismo de excitación-emisión como sigue. Cuando al semiconductor llega un fotón, o cuanto de energía electromagnética, cederá su energía a un electrón situado en la banda de valencia, catapultándolo hacia la banda de conducción, siempre que el fotón porte una energía mayor que la del intervalo de energía prohibida. Este es el mecanismo básico de excitación luminiscente. Ahora bien, el electrón excitado tiende a desexcitarse y caer de nuevo a la banda de valencia. Esta relajación energética del electrón lleva aparejada la emisión de otro fotón con la energía del intervalo. Este último mecanismo constituye la emisión luminiscente.

El modelo que acabamos de exponer está muy simplificado. La realidad reviste mayor complejidad. En los semiconductores las bandas de conducción y de valencia presentan una curvatura característica de cada material, con mínimos y máximos, situados a lo largo de un eje de abscisas que representa el número de onda, variable que es inversamente proporcional a la longitud de la periodicidad de la red cristalina del semiconductor. Como consecuencia de ello, las transiciones radiativas tienden a producirse en las zonas donde la banda de energía prohibida es menor, es decir, entre el mínimo de energía de la banda de conducción y el máximo de energía de la banda de valencia.

En razón de la morfología de las bandas de energía los semiconduc-

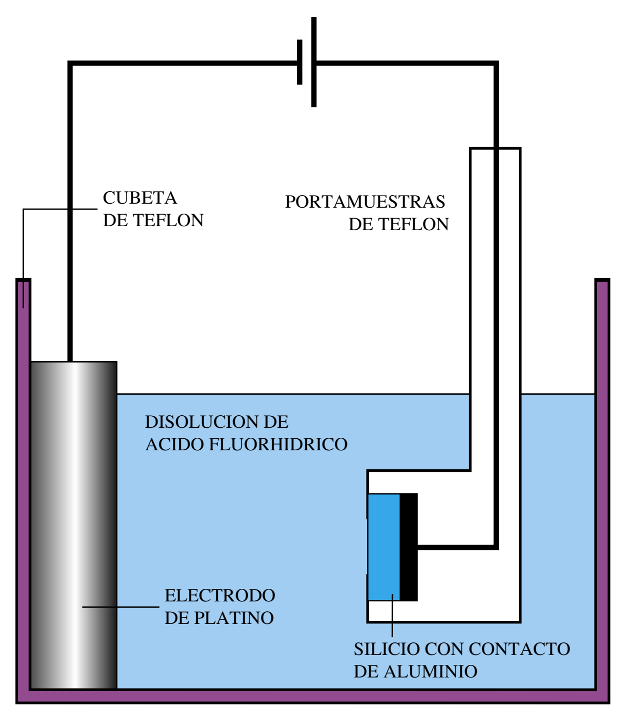
4. TODOS LOS SEMICONDUCTORES se caracterizan por tener una banda de energía prohibida estrecha, que no requiere fotones muy energéticos para promocionar electrones de la banda de valencia a la de conducción. Esta banda de energía prohibida posee una forma típica para cada material, que depende de la estructura cristalina. Si el mínimo de la banda de conducción coincide con el máximo de la banda de valencia, el semiconductor se llama "directo" (*a*), ya que la excitación y desexcitación de electrones entre las bandas sólo llevan aparejadas la participación de fotones de energías hν mayores que la del intervalo ($h\nu > E_g$). Los semiconductores en los cuales el máximo de la banda de valencia no coincide con el mínimo de la banda de conducción se llaman "indirectos" (*b*). En este tipo de semiconductores, las transiciones de electrones de la banda de valencia a la de conducción necesitan de la intervención adicional de fonones (energías cuantizadas de vibración de la red cristalina). Por tanto, el número de transiciones de una banda a otra es mucho menor que en los semiconductores directos.

tores se dividen en dos tipos: de intervalo directo y de intervalo indirecto. En los semiconductores de intervalo directo, el mínimo de la banda de conducción coincide con el máximo de la banda de valencia; es decir, tienen el mismo número de onda. Basta entonces una simple transición del electrón para que se emita un fotón; cuando eso ocurre hablamos de transición radiativa.

El silicio es un semiconductor indirecto. El mínimo de la banda de conducción y el máximo de la banda de valencia no coinciden para un mismo valor del número de onda. Para que la transición del electrón también se produzca en este segundo caso, es necesario un nuevo mecanismo, la denominada transición fonónica.

El fonón es una partícula asociada a las ondas viajeras que se producen por la vibración térmica de una estructura cristalina. A temperaturas por encima del cero absoluto, las posiciones atómicas y moleculares de los sólidos no son estáticas, sino que vibran alrededor de su posición de equilibrio. En los materiales con estructura cristalina, algunas de estas vibraciones térmicas se transmiten a lo largo de la red. La energía asociada a estas vibraciones puede cuantificarse, es decir, tiene valores discretos y fijos que dependen del tipo de estructura cristalina.

Las vibraciones térmicas son transmisiones de energía no radiativa; se producen, pues, sin emisión de fotones. En el caso de semiconductores indirectos, para que sea posible la transición de electrones entre el mínimo de la banda de conducción y el máximo de la banda de valencia ha de haber una combinación entre transiciones radiativas (fotones) y no radiativas (fonones). El hecho de que la transición conste de más de un mecanismo determina que la probabilidad de que ocurra decrezca considerablemente y, a la vez, que el tiempo empleado en la transición aumente también de forma notable. La probabilidad y tiempo que dura la transición pueden medirse con facilidad, lo que posibilita la rápida determinación del tipo de semiconductor que se esté estudiando.



5. FORMACION DE SILICIO POROSO por métodos electroquímicos, a partir de la disolución de silicio monocristalino en una célula que contiene una disolución de ácido fluorhídrico. Al utilizar el silicio como electrodo positivo y un contraelectrodo de platino se consigue que el ácido fluorhídrico se disocie en los iones hidrógeno y flúor. Los iones de flúor se sienten atraídos por el electrodo positivo y van sustituyendo enlaces de silicio hasta provocar la disolución de éste para formar SiF_6^{2-}. Este proceso de disolución de silicio se produce de manera perpendicular a la superficie, llevando a la formación de poros en el silicio y las consiguientes fibras.

En el silicio monocristalino se tiene una zona de energía prohibida, o intervalo, de 1,1 electronvolt. (Un eV equivale a $1{,}6 \times 10^{-19}$ joule.) Con ese valor se requieren fotones que posean energía mínima en el infrarrojo cercano para provocar transiciones radiativas de electrones, que emitirán también luz en el infrarrojo al desexcitarse. Se presentan rendimientos luminiscentes en torno a $10^{-4} - 10^{-5}$ fotones emitidos por fotón absorbido, lo que significa que, por cada 10.000 – 100.000 fotones que se hacen incidir en el material, sólo uno logra completar una transición radiativa. Los tiempos de vida media de la transición se sitúan en torno al microsegundo. En los semiconductores directos, las transiciones tienen valores de rendimiento en la luminiscencia superiores al 1 %, y tiempos de vida inferiores al nanosegundo.

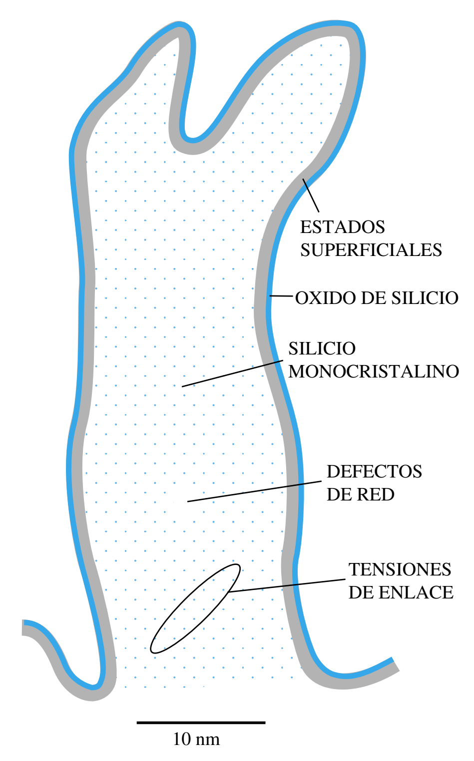
Teniendo, pues, presentes, todos estos principios generales, volvamos a las fibras cuánticas de silicio. ¿Cómo se fabrican? Por lo común, a partir de una reacción electroquímica en una disolución de ácido fluorhídrico. La reacción transcurre dentro de una célula electroquímica en la que se introduce el silicio, que actúa de ánodo, o polo positivo, en la transmisión de corriente dentro de la disolución. Como electrodo catódico se puede utilizar platino. La disolución, de ácido fluorhídrico, cierra el circuito, transportando por vía iónica la carga eléctrica entre los dos electrodos.

El proceso electroquímico crea campos eléctricos locales en la superficie del silicio, más intensos en las concavidades de las imperfecciones de su superficie, a donde se ven atraídos los iones fluoruro que se encuentran disociados en la disolución. Estos iones, al ser muy electronegativos, atacan el enlace entre átomos de silicio, y forman compuestos SiF_6^{2-}. En este proceso de disolución se empiezan a formar poros perpendiculares a la superficie y hacia el interior del material; así se originan las fibras cuánticas.

En el silicio poroso, las fibras muestran una superficie amplia en relación con su volumen, razón que puede llegar a los 1000 m^2 por centímetro cúbico. Gracias a esa sorprendente propiedad, el silicio puede adsorber gran cantidad de gases de la atmósfera. Se hace, pues, necesario mantener estables la estructura y propiedades de la superficie porosa, para evitar que la temperatura y la humedad del medio afecten a las condiciones de almacenamiento.

La propiedad más importante del silicio poroso es, sin duda, la capacidad de las fibras cuánticas de emitir luz en el visible. El silicio monocristalino emite en el infrarrojo y con muy poca eficiencia. En cambio, las fibras cuánticas de silicio emiten en el visible y con un rendimiento muy alto. ¿Cómo explicar semejante capacidad?

Se avanzaron varias propuestas. Algunas se basaban en la formación de varios compuestos superficiales durante el proceso electroquímico. Los compuestos emisores de luminiscencia serían esencialmente óxidos, hidruros o especies moleculares más complicadas. Fundamentaban su hipótesis en que tales compuestos, al sintetizarse en otro tipo de ambiente, evidenciaban un comportamiento lu-



6. MORFOLOGIA de una fibra de silicio poroso. La fibra consta de una parte central ordenada, correspondiente al silicio monocristalino original, donde se produce la fotoluminiscencia. En esa estructura cristalina se recogen algunas imperfecciones debidas a defectos de red, tensiones de enlace o estados superficiales. La estructura cristalina se encuentra rodeada de una zona amorfa correspondiente a la generación de óxido de silicio como consecuencia de la exposición a la atmósfera o a otros agentes oxidantes.

miniscente bastante parecido al del silicio poroso. Pero ese planteamiento chocaba frontalmente contra algo inobjetable: los espectros luminiscentes no sufrían variaciones apreciables con el cambio en la composición de oxígeno e hidrógeno en la superficie de los poros. En consecuencia, el intento de vincular la luminiscencia con distintos compuestos superficiales terminó por abandonarse.

Por contra, ha ido adquiriendo consistencia la teoría del confinamiento cuántico. De acuerdo con la misma, los espacios nanométricos donde se confinan los electrones pueden asociarse a pozos cuánticos. En un pozo cuántico los electrones están confinados en regiones muy estrechas y la naturaleza cuántica de los electrones se manifiesta predominante. Los electrones empiezan a tener valores de energía cuantificados, discretos. Por su parte, la banda prohibida de energías del semiconductor aumenta en proporción inversa al cuadrado de la anchura de la fibra donde están confinados los electrones.

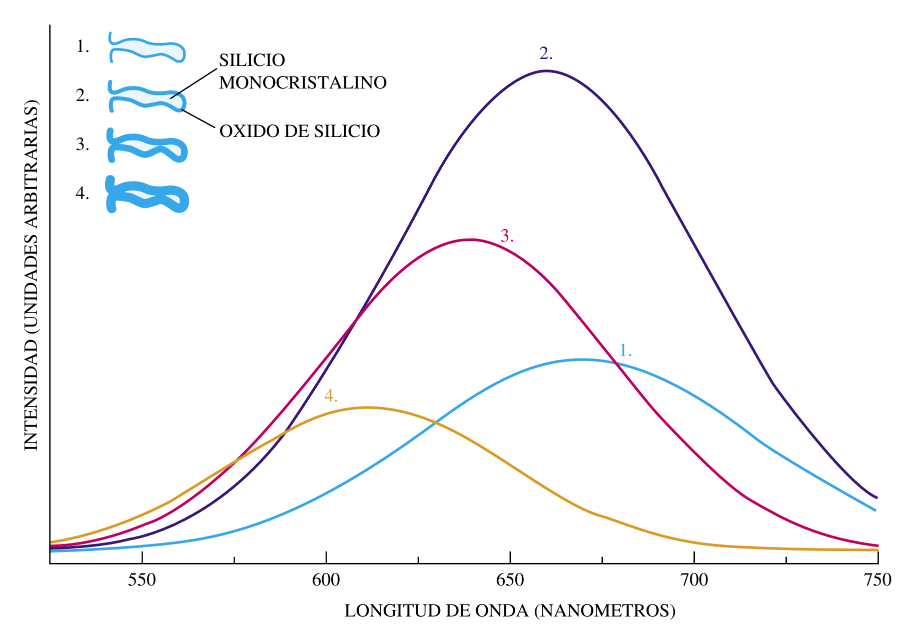
Por tanto, en un pozo cuántico aumenta la energía necesaria para excitar un electrón. Crece también la energía de emisión de luz al desexcitarse el electrón cuando disminuye el tamaño de las fibras. En virtud de ese fenómeno, las emisiones, que se daban en el infrarrojo para el silicio monocristalino, se sitúan ahora en el visible en el caso de las fibras.

El espectro de emisión luminosa del silicio poroso es bastante amplio, dentro del rango visible. La razón es inmediata: no existe un control riguroso de la anchura con que se forman las fibras cuánticas en el proceso electroquímico, sino que se produce una distribución estadística gaussiana de dichas anchuras. El espectro obtenido de la radiación emitida presenta, a su vez, una configuración de distribución gaussiana.

A partir de modelos de filtros interferenciales para reducir la anchura del pico de emisión del silicio poroso, se está empezando a fabricar estructuras porosas constituidas por capas alternativas de silicio de dos porosidades distintas, con índices de refracción también muy diferentes. Si se ajustan los espesores de las capas a ciertos valores constantes, se producen fenómenos de interferencia entre las ondas que inciden o se reflejan en la estructura, anulando las contribuciones de radiación que no se ajusten a una longitud de onda determinada por el espesor de las capas. De esta forma, la anchura del pico de luminiscencia se reduce drásticamente.

¿Qué decir del rendimiento en luminiscencia, mayor en las fibras cuánticas que en el silicio monocristalino? Se pensó en un principio que la región de energías prohibidas del silicio poroso, además de haberse agrandado con respecto a la del silicio original, habría modificado el carácter del intervalo. Se adujo que, al tratarse ahora de un semiconductor de intervalo directo, la probabilidad de conseguir desexcitaciones radiativas de los electrones sería mucho mayor, pues no habría contribuciones no radiativas de fonones. Pero esta hipótesis no se ajustaba a otro dato experimental: los tiempos de vida media de las fibras cuánticas de silicio, es decir, el tiempo que tarda en emitir un fotón después de haberlo excitado, era muy parecido al del silicio monocristalino.

Por tanto, las fibras cuánticas de silicio no podían ser de intervalo



7. ASI EVOLUCIONA el pico de luminiscencia del silicio poroso a partir de distintos estados de oxidación. Recién formadas las fibras (*1*), el pico de luminiscencia se encuentra determinado. Al empezar a oxidar la muestra, el pico progresa hacia longitudes de onda más bajas y aumenta su intensidad (*2*). Este efecto se asocia a la disminución de la anchura de las regiones cristalinas de silicio y a la disminución de centros de desexcitación no radiativos. La evolución posterior muestra cómo el pico sigue evolucionando hacia longitudes de onda menores (*3* y *4*), mientras que la intensidad decrece al aumentar la oxidación de la estructura cristalina.

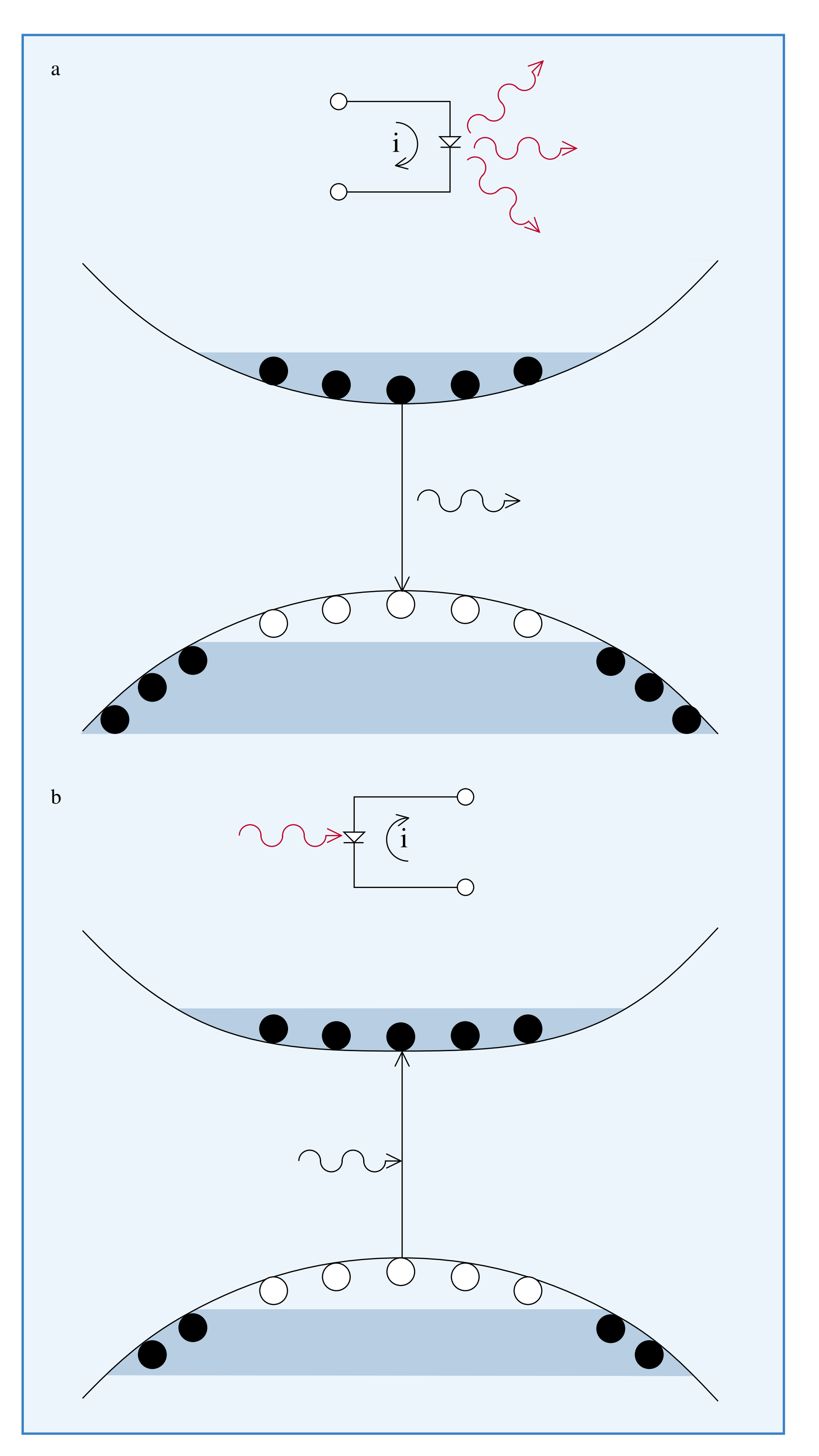
directo. Para que lo fueran, debían encontrarse tiempos de transición mucho menores de los que se medían. Durante cierto tiempo se empleó la expresión intervalo pseudodirecto para calificar las características del semiconductor que se obtenían a partir de las fibras cuánticas de silicio, expresión que hoy se evita, pues se ha demostrado que los fonones siguen interviniendo en la fotoemisión de las fibras cuánticas. Ahora se postula que en las fibras cuánticas se produce un ensanchamiento de la región de energías prohibidas, pero no se pierde su condición de semiconductor de intervalo indirecto.

Mientras prosigue la investigación sobre las causas de la luminiscencia, se advierte ya un progreso notable en la fabricación de las fibras cuánticas de silicio, merced a un mayor control de las propiedades luminiscentes, que evolucionan con el tiempo y con los entornos a que se hallan expuestas las fibras.

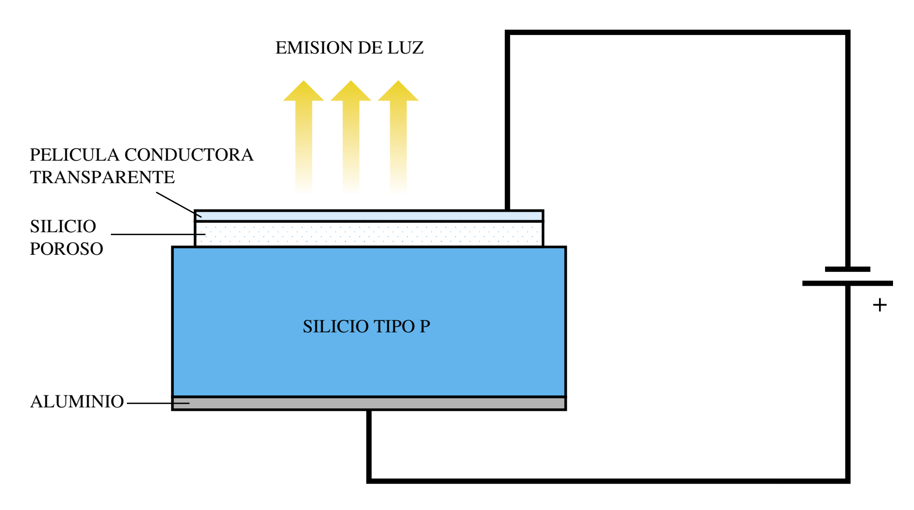
La evolución se traduce en la variación de posición e intensidad del espectro de luminiscencia. La superficie porosa se va oxidando con el transcurso del tiempo y con el contacto con agentes oxidantes del medio (atmósfera, agua, etc.). Si la superficie porosa se oxida, una parte del volumen de las fibras cuánticas, la más cercana a su superficie, pierde su estructura de silicio cristalina y adquiere una composición oxídica (SiO_2), propia de un material aislante y amorfo. Este cambio estructural implica una reducción de la anchura de las fibras cuánticas del silicio poroso, lo que lleva aparejado un nuevo incremento de la anchura de la región de energías prohibidas.

Varía también la intensidad luminiscente. La disminución de la anchura de las fibras porosas incrementa el número de centros de luminiscencia en el visible y, por tanto, la intensidad del pico de fotoemisión. Pero si, al oxidar, se sigue reduciendo la anchura de la fibra, se empezarán también a anular los centros de emisión en el visible al convertir la estructura cristalina en un óxido amorfo.

Este cambio de las propiedades luminiscentes de las fibras cuánticas de silicio con el tiempo constituye un grave inconveniente para el desarrollo de dispositivos electroluminiscentes. Se impone, pues, estabilizar su superficie, mediante la oxidación de la superficie externa por métodos electroquímicos o térmicos, hasta que el contacto de la superficie con agentes



8. EN EL MECANISMO de electroluminiscencia los electrones se inyectan en la banda de conducción del semiconductor. Al desexcitarse producen la emisión de fotones (*a*), y no es necesario incidir con fotones en el silicio poroso para producir pares electrón-hueco. El ejemplo típico de dispositivo basado en este mecanismo es el de los diodos emisores de luz. El mecanismo contrario a la electroluminiscencia también se presenta en los semiconductores (*b*). Los fotones pueden excitar electrones desde la banda de valencia hasta la de conducción y generar una fotocorriente. El mecanismo descrito es la base del funcionamiento de las células fotovoltaicas solares y de los fotodiodos detectores de luz.



9. DISPOSITIVOS ELECTROLUMINISCENTES construidos a partir del silicio poroso. Para ello ha de depositarse una capa conductora y transparente en la superficie porosa, que permita liberar los fotones producidos. El proceso requiere capas conductoras muy delgadas para dejar pasar la luz y que formen un buen contacto eléctrico con la superficie para que funcionen a potenciales eléctricos bajos.

oxidantes no le afecte, o mediante la formación de capas de distintos materiales en dicha superficie, que sirvan de barrera contra la acción exterior.

En el caso de la electroluminiscencia no se utilizan fotones para excitar los electrones desde la banda de valencia hacia la de conducción; se inyectan directamente electrones en la banda de conducción que, al desexcitarse, emiten fotones. Pero en el proceso de desarrollo de dispositivos electroluminiscentes se están encontrando numerosas dificultades técnicas. Se necesitan grandes diferencias de potencial para inyectar electrones en la capa porosa a través de contactos eléctricos. Tampoco es fácil lograr un buen contacto eléctrico sobre la superficie porosa. Con contactos líquidos, pensemos en una disolución conductora salina, este problema se evita, ya que el líquido penetra por la superficie porosa y produce un contacto eléctrico eficiente. Sin embargo, los contactos eléctricos sólidos son fundamentales, pues constituyen la única vía de entrada práctica para el desarrollo de dispositivos optoelectrónicos.

JOSE MANUEL MARTINEZ-DUART, RICARDO GUERRERO LEMUS y JOSE D. MORENO pertenecen al departamento de física aplicada de la Universidad Autónoma de Madrid. Martínez-Duart, director de dicho departamento, está vinculado al Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid del CSIC. Especialista en materiales avanzados, en particular en lámina delgada, ha escrito numerosos artículos y varios libros. Guerrero, profesor experto en materiales nanoestructurados, ha centrado sus investigaciones en la caracterización y aplicaciones del silicio poroso. Moreno estudia las propiedades electroluminiscentes del silicio poroso.

Ahora bien, si el contacto no se realiza en toda la superficie porosa del silicio, resultará muy difícil que los electrones inyectados penetren en las fibras. Para remover ese obstáculo, habrá que provocar un incremento sustancial de la diferencia de potencial necesaria en la introducción de dichas cargas. Importa resolver este problema, pues los dispositivos microelectrónicos donde deben integrarse las fibras cuánticas de silicio trabajan con potenciales de sólo unos cuantos volts.

El contacto operado sobre la superficie porosa debe ser transparente, de suerte que permita la salida de los fotones emitidos en los procesos de desexcitación electrónica que se producen en las fibras al inyectar electrones. Esta condición constituye un factor limitante de los posibles materiales a escoger para formar el contacto eléctrico con la superficie porosa. En los primeros ensayos, el contacto eléctrico se realizaba con deposiciones de oro de mínimo espesor en condiciones de ultra-alto vacío. Se conseguía una transparencia que apenas alteraba la transmisión de fotones desde la superficie porosa hacia el exterior. Sin embargo, a pesar de la alta conductividad eléctrica del oro y de su estabilidad frente a la oxidación, este contacto no dio buenos resultados porque requiere voltajes muy elevados (30-100 volts) para que el dispositivo sea electroluminiscente. Además, la eficiencia luminiscente es muy baja: el metal evaporado no se difunde bien entre la superficie porosa, lo que produce imperfecciones que inducen procesos de desexcitación electrónica no luminiscentes.

Para evitar las dificultades señaladas con los contactos metálicos, nuestro equipo de la Universidad Autónoma de Madrid se centró en el empleo de polímeros conductores. En la disolución orgánica, los monómeros humedecen la superficie porosa y así se polimerizan en las paredes de las fibras cuánticas. En un proceso electroquímico se puede depositar una fina capa polimérica capaz de producir un contacto eléctrico casi transparente en la superficie porosa y capaz, asimismo, de inyectar corriente eléctrica a voltajes bajos.

Son múltiples las aplicaciones de las fibras cuánticas de silicio en dispositivos optoelectrónicos y fotodetectores, células solares fotovoltaicas y sensores de gases. A raíz del descubrimiento del láser en 1960, se pensó en la posibilidad de utilizar la luz coherente, monocromática, para transmitir información, sustituyendo las señales eléctricas de baja frecuencia. Con la modulación de la luz coherente arrancó la nueva técnica optoelectrónica basada en la generación, captación y procesado de señales electromagnéticas.

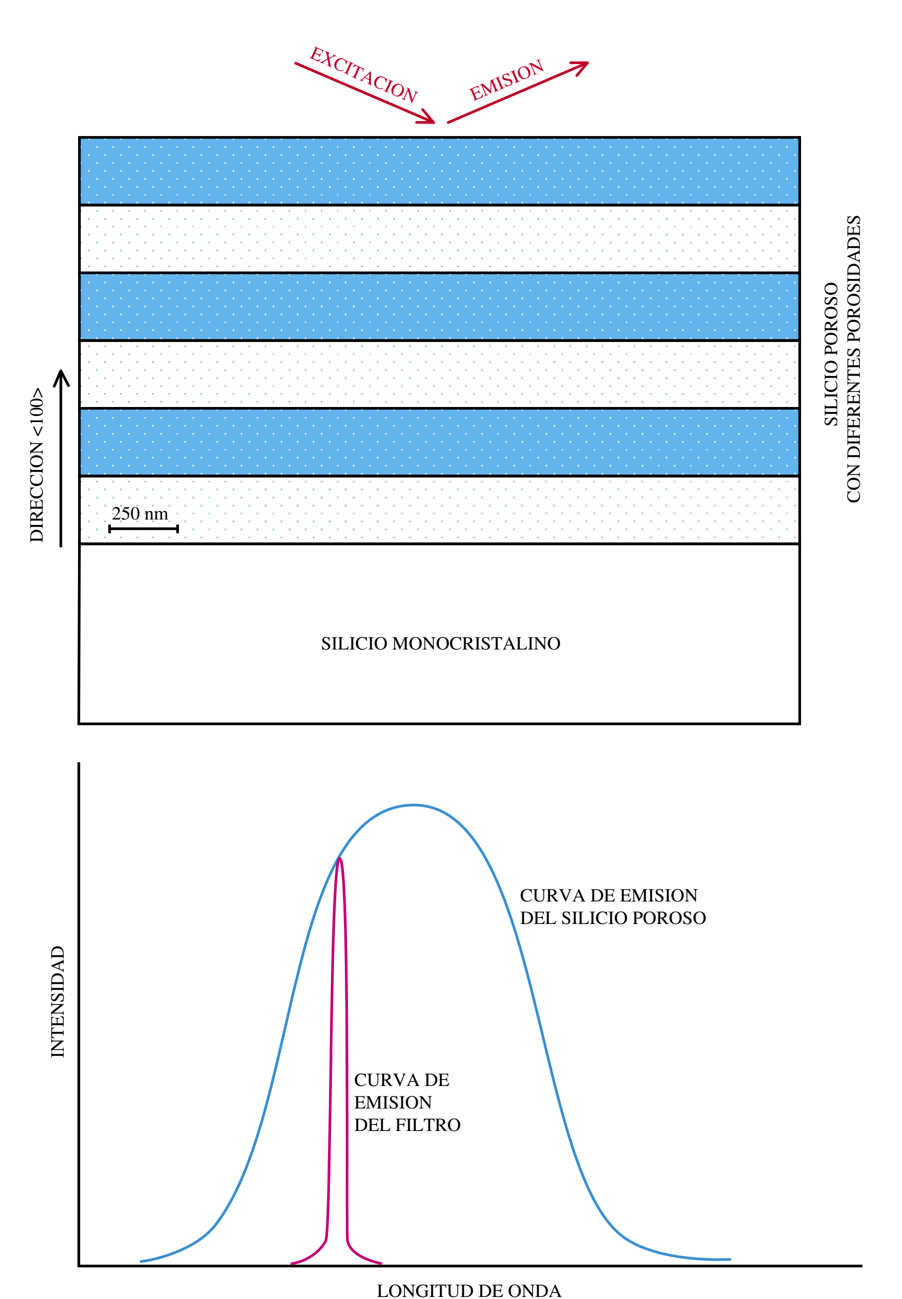
Se empezó trabajando en sistemas de transmisión fotónica por fibra óptica. Pero había que convertir las señales ópticas en eléctricas en el extremo receptor, y las señales eléctricas en ópticas en el extremo emisor. Para resolver esa dificultad, se idearon dispositivos optoelectrónicos basados en aleaciones nuevas de semiconductores, como el arseniuro de galio o arseniuro de galio-aluminio. Aunque la técnica optoelectrónica ha recorrido un largo trecho, los constantes retos que encuentra en su avance la han convertido en campo activísimo. Entre los problemas que tiene planteados resaltaremos la necesidad de integrar los dispositivos fotónicos con los electrónicos asociados a ellos. Hasta la fecha, dichos dispositivos deben conectarse de uno en uno.

La integración en bloque podría alcanzarse mediante el desarrollo de dispositivos electroluminiscentes a partir de fibras cuánticas de sili-

cio. Al ser el silicio el material por excelencia de la técnica microelectrónica, nada impediría la integración de los dispositivos ópticos con los dispositivos electrónicos, ni, en particular, la participación de las fibras cuánticas de silicio en la fabricación de circuitos microelectrónicos de integración ultra-alta.

Las fibras cuánticas de silicio podrían emplearse también en células solares fotovoltaicas. Los modelos habituales se fabrican a partir de silicio monocristalino, con lo que se obtienen rendimientos en torno al 18 % en la transformación de radiación solar en energía eléctrica. Esta eficiencia puede llegar al 26 % si se utilizan semiconductores, como el arseniuro de galio, con intervalo cercano a los 1,45 eV, pero el coste de fabricación es mayor. Las fibras cuánticas de silicio pueden incrementar el valor de su intervalo al disminuir su tamaño, lo que permitiría situar este material en valores de intervalo también cercanos a los 1,45 eV. Además, la superficie porosa es muy inhomogénea, lo que contrasta con la homogeneidad superficial con que se fabrican las láminas de semiconductores; ello significa que la fibra actúa como cuerpo negro, absorbiendo la radiación solar incidente. Este comportamiento, similar al de las láminas antirreflejantes, redoblaría el rendimiento del dispositivo.

Por último, las fibras cuánticas de silicio sirven para operar como sensores de gases. Esta sensibilidad, demostrada ante distintos entornos ambientales, se manifiesta de múltiples formas. Por una parte, la luminiscencia de las fibras evidencia variaciones en intensidad y posición del espectro, en función del gas adsorbido en la superficie. Por otra parte, se observan incrementos muy significativos de la conductividad eléctrica del silicio poroso en función de la atmósfera ambiental. Es en este apartado en el que los investigadores han depositado una mayor esperanza del silicio poroso como sensor de gases. Las estructuras fibrilares adsorben las moléculas del gas en cualquier entorno atmosférico. Si una vez producida la adsorción hacemos pasar una onda eléctrica cuadrada por el dispositivo poroso, se obtendrán, de acuerdo con la frecuencia de la onda eléctrica, comportamientos dieléctricos dependientes tanto de la concentración como de la naturaleza del gas adsorbido.



10. PARA REDUCIR LA ANCHURA del pico de luminiscencia del silicio poroso se han fabricado estructuras multicapa con porosidades alternativas, que producen índices de refracción diferentes. Consiguiendo que el espesor de dichas capas tenga unos valores prefijados, se pueden fabricar filtros interferenciales que restrinjan la emisión de luz a un pequeño segmento del espectro de emisión del silicio poroso.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SILICON QUANTUM WIRE ARRAY FABRICATION BY ELECTROCHEMICAL AND CHEMICAL DISSOLUTION OF WAFERS. L. T. Canham, en *Applied Physics Letters*, vol. 57, n.º 10, págs. 1046-1048, 1990.

VISIBLE ELECTROLUMINESCENCE FROM POROUS SILICON. N. Koshida y H. Koyama en *Applied Physics Letters*, volumen 60, n.º 3, págs. 347-349, 1991.

HIGHLY SENSITIVE PHOTODETECTOR USING POROUS SILICON, J. P. Zheng, K. L. Jiao, W. P. Anderson y H. S. Kwok en *Applied Physics Letters*, vol. 61, n.º 4, págs. 459-461, 1992.

POROUS SILICON SCIENCE AND TECHNOLOGY. Dirigido por J.-C. Vial y J. Derrien. Springer-Verlag, 1995.

GAS SENSING PROPERTIES OF POROUS SILICON. I. Schechter, M. Ben-Chorin y A. Kux en *Analytical Chemistry*, vol. 67, n.º 20, páginas. 3727-3732, 1995.

ELECTROLUMINISCENT POROUS SILICON. José M. Martínez Duart, V. P. Parkhutik, Ricardo Guerrero Lemus y José D. Moreno en *Advanced Materials*, volumen 7, n.º 2, páginas. 226-228, 1995.

Reconsideración del amianto

Hubo tiempos en los que parecía tan inofensivo que se le usaba hasta para lavarse los dientes. Esta singular sustancia intriga al mundo desde hace más de dos mil años

James E. Alleman y Brooke T. Mossman

El futuro del amianto se presenta irremediablemente sombrío. Tras veinte años de terroríficos titulares, esta extraña fibra quizá sea el agente contaminante más temido del mundo. No cabe duda de que su reglamentación y su eliminación son las más costosas. Los gastos paliativos anuales rozan el billón de pesetas, un asombroso dispendio incluso para tiempos de entusiasmo ambientalista como los que vivimos. El sector del amianto se encuentra lógicamente en una situación de gran crisis, que no se hubiera producido si el producto no hubiera sido tan idealizado previamente.

Bajo el nombre de amianto se comprende toda una familia de silicatos, es decir, de materiales constituidos por silicio y oxígeno, que se caracterizan por su estructura fibrosa. Aparentemente favorecido con propiedades tan útiles como la suavidad, la flexibilidad o la resistencia al fuego, se le consideró en tiempos como la seda de un mundo mineral mágico. Durante siglos se han tejido con amianto capas, manteles, telones de teatro y trajes de protección contra incendios. Los aislamientos de amianto no sólo conseguían un ahorro de energía sino que también protegían a los trabajadores de posibles quemaduras. El uso del amianto en las zapatas de freno y en las guarniciones del embrague mejoró la seguridad de los coches de carreras y de los autobuses escolares; también fue muy eficaz en filtros de aire para ventiladores de hospitales, en filtros de cigarrillos y en máscaras antigás militares. No deja de ser chocante que el denostado amianto fuera antes tenido como el paladín de la seguridad humana.

Altibajos de la historia del amianto

Las primeras referencias al amianto se remontan a los filósofos antiguos. Un discípulo de Aristóteles, Teofrasto, se refiere probablemente a él cuando cita en su obra clásica, *De las piedras*, escrita hacia el 300 a.C., una substancia innominada, con el aspecto de madera podrida y que bañada en aceite arde sin consumirse. En los cuatro siglos siguientes diversos autores griegos y romanos fueron descubriendo aspectos nuevos y aplicaciones cada vez más amplias de tan extraña piedra. El geógrafo Estrabón localizó la primera cantera griega de amianto en la isla de Eubea en el siglo primero y sus fibras pétreas fueron cardadas e hiladas como si fueran de lana para tejer toda una gama de prendas de vestir inmunes a las llamas.

En su obra *De Materia Medica*, Dioscórides, médico griego del siglo primero, habla de pañuelos de amianto reutilizables, que se ofrecían a los espectadores teatrales, y cuenta que se limpiaban y blanqueaban con fuego. También describe Dioscórides una cantera de amianto en el monte Olimpo de Chipre, dándole nombre por primera vez: *amiantos*, que significa "impoluto", para expresar su resistencia al fuego. Por lo menos otros tres autores, entre ellos Plutarco, indican que las llamas perennes de la Acrópolis brotaban de lámparas con mecha de amianto.

La primera mención del amianto aparece en la obra *De las piedras*, escrita por Teofrasto, un discípulo de Aristóteles. En ese texto se describe una substancia con aspecto de madera podrida que, impregnada de aceite, arde sin consumirse.

De Materia Medica, texto médico de Dioscórides, del siglo primero, describe lienzos reutilizables, hechos de amianto, que podían limpiarse y blanquearse al fuego.

Plinio el Viejo menciona la substancia *asbestinon* en su obra *Historia Natural*.

300 a.C.

50 d.C.

El manuscrito de la *Historia Natural* de Plinio el Viejo, también del siglo primero, contiene uno de los análisis más completos de este producto que se hayan escrito en los primeros tiempos. De Plinio proviene la otra denominación del mineral, asbesto, derivada de *asbestinon*, "inextinguible". Según Plinio, el asbesto o amianto se utilizaba en una serie de productos textiles, desde manteles y servilletas de fácil limpieza hasta sudarios para personajes de la realeza, incinerados en piras funerarias (los cuerpos se consumían por el calor pero los sudarios no ardían).

En los mil años que siguieron, el amianto continuó atrayendo la atención de reyes y alquimistas, desde Europa occidental hasta China. Incluso el Vaticano reclamó una túnica de amianto que se había encontrado en un antiguo sarcófago romano. El hecho de que el amianto fuese, en realidad, una piedra pareció olvidarse mientras tanto.

El posible origen de estas extraordinarias fibras estaba rodeado de fantasías. Los alquimistas medievales hicieron correr el rumor de que las fibras de amianto crecían a manera de pelos en salamandras resistentes al fuego (de ahí viene otro nombre más, *salamandra*, de este tipo de piedra). Los tratados de alquimia solían incluir la imagen de una salamandra omnipotente rodeada de llamas. Francia adoptó este símbolo como emblema de la realeza en banderas, monedas y revestimientos de chimenea a principios del siglo XVI. (Según una leyenda popular, el interés de los franceses por el amianto venía de 700 años atrás, cuando Carlomagno prendió fuego a un mantel de amianto para intimidar a los convidados a su mesa.)

La salamandra no era sino uno de los numerosos mitos sobre el origen del amianto. Otros fueron las escamas de lagarto o las plumas de ave. Las tentativas de definición de estas fibras condujeron a una curiosa nomenclatura: se asignaron finalmente varias docenas de nombres a las diferentes formas de amianto, tales como "cuero de la montaña", "lino incombustible", "seda de roca" y "alumbre emplumado".

Marco Polo, de un modo casual y afortunado, devolvió el amianto al dominio científico. Tras visitar una explotación minera de amianto en China a finales del siglo XIII, desmontó totalmente la teoría de la salamandra en su diario y lo clasificó como una piedra. Georgius Agricola, uno de los fundadores de la mineralogía, aportó un decisivo empuje a la comprensión científica de la substancia en el siglo XVI con su *Tratado de Mineralogía*. Tras una minuciosa revisión y puesta al día de la información sobre los diversos tipos de amianto, Agricola presenta una prueba clasificatoria bastante inusual y advierte a sus lectores que al probar el sabor del amianto se pueden "pinchar un poco la lengua".

El tráfico del amianto

En 1660, cuando Inglaterra constituyó la Royal Society, la comunidad científica mundial estaba cada vez más fascinada por el amianto. La regia sociedad publicó no menos de ocho trabajos y cartas sobre el amianto en los cuarenta años siguientes. Más tarde, en 1727, Frank E. Brückmann, mineralogista alemán, escribió el primer volumen completo sobre el tema, al que pronto siguieron publicaciones semejantes de otros dos destacados científicos de la época, Martin F. Ledermüller y Torben Bergman. La obra de Ledermüller era un tratado riguroso, que describía cada tipo de fibra conocido en unión de detalladas ilustraciones en color.

A cada nueva obra publicada se ensanchaba el campo de aplicaciones. Chaquetas, camisas y manguitos vinieron a unirse a las prendas de vestir incombustibles; incluso se pensó en hacer un "Libro de la Eternidad" indestructible, impreso en oro sobre papel de amianto. Siendo todavía un mozalbete, Benjamin Franklin llevaba siempre consigo un pequeño monedero de fibra de amianto, que al no poder arder no le haría el proverbial agujero en el bolsillo. Durante su primer viaje a Inglaterra, Franklin vendió el monedero a Sir Hans Sloane, benefactor del Museo Británico, en cuya colección de Historia Natural se encuentra actualmente.

Las propiedades del amianto fueron también aprovechadas por un grupo de bribones que vivieron a sus expensas a finales del siglo XVIII y principios del XIX, engañando a gente religiosa

JAMES E. ALLEMAN y BROOKE T. MOSSMAN comparten su interés por el amianto. Alleman, profesor en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Purdue, se dedica a la historia y las aplicaciones prácticas del mineral. Mossman es profesor en la Universidad de Vermont e investiga los efectos del amianto sobre la salud.



Las vírgenes vestales custodiaban la llama eterna en el santuario de Vesta, diosa del fuego hogareño; la mecha de la lámpara era de amianto.

Hacia el año 800, Carlomagno echó al fuego un mantel de amianto y lo sacó luego intacto, para impresionar a los invitados a su mesa.



Algunos alquimistas de la Edad Media tomaron como origen del amianto los pelos de salamandras resistentes al fuego.

Marco Polo visitó una mina de amianto en China durante la segunda mitad del siglo XIII, sacando la conclusión de que el amianto es una piedra y no el pelo de un lagarto lanudo.

100

1000

1850

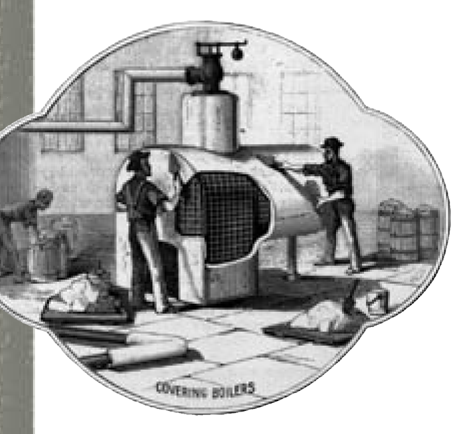
1828: primera patente estadounidense conocida sobre el amianto, como material de aislamiento en las máquinas de vapor
1834: patente británica sobre uso del amianto en cajas de caudales
1853: patente británica sobre uso del amianto en lubricantes de rodamientos

ASBESTOS ROOFING

Fieltro de techado elaborado con amianto

1859: patente británica sobre calderas forradas de amianto
1865: patente británica sobre material aislante de amianto para cables eléctricos
1868: patente de EE.UU. sobre fieltro de techado de amianto

1820



Amianto utilizado como material aislante

1800

A principios del XIX comenzaron a aparecer aparejos y telones teatrales a prueba de incendios por toda Europa.

Monedero de amianto que Benjamin Franklin se llevó a Inglaterra en 1724.

La Royal Society, fundada en Inglaterra en 1660, publicó algunos de los primeros trabajos científicos sobre el amianto en la revista *Philosophical Transactions*.

El *Tratado de Mineralogía* escrito por Georgius Agricola en el siglo XVI describe extensamente las propiedades del amianto y los lugares donde podía éste encontrarse, en Grecia, India y Egipto.

1500

crédula e ingenua. Les vendían como auténticas reliquias de trozos de la túnica y de la cruz de Cristo inmunes al fuego, que en realidad eran de amianto. También hubo una compañía de cómicos errantes que utilizaban en sus espectáculos guantes y capas de amianto para desafiar las llamas y maravillar al público. Otro grupo, llamado "salamandras humanas", se hizo famoso por asar filetes en la mano manteniéndose en el interior de una hoguera.

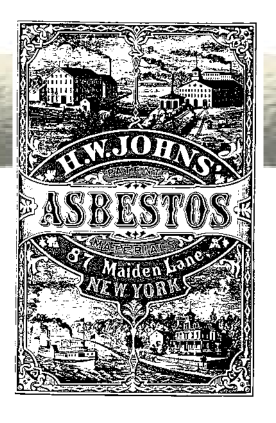
Un conocido científico italiano, Giovanni Aldini, convirtió hacia 1820 este arriesgado truco en la primera explotación comercial del amianto realmente lograda, diseñando una línea de ropa especializada para bomberos urbanos, que suscitó un enorme interés y atrajo rápidamente clientes, desde París a Ginebra. Poco después comenzaron a aparecer los telones de amianto, que reforzaron la seguridad de los escenarios y sin duda salvaron muchas vidas en los temibles incendios teatrales.

Fue, sin embargo, la máquina de vapor la que elevó el amianto al estrellato. Esas enormes máquinas habían llegado ya a sus límites físicos y para conseguir mayor seguridad y eficacia se necesitaban innovaciones técnicas. El amianto puro resultaba demasiado áspero y abrasivo para las partes móviles de la máquina. Pero al mezclarlo con caucho se obtenía la combinación perfecta, que permitía elaborar piezas internas más flexibles, cuales son las juntas y guarniciones.

Hacia 1860 el uso del amianto había tocado techo, nunca mejor dicho. Tras unos escarceos sobre pinturas a prueba de incendios, un joven constructor de Nueva York, Henry Ward Johns, desarrolló un papel alquitranado ignífugo que venía como anillo al dedo en una época en la que los incendios de edificios eran un verdadero azote. Este material para techar, una especie de emparedado de alquitrán, arpillera y papel de manila, abrió el camino a una vasta industria de productos de la construcción basados en el amianto.

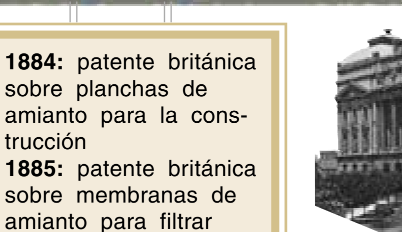
Las mezclas de amianto y cemento se utilizaron por primera vez en materiales de construcción a poco de iniciarse el siglo. Se empezó con un panel de construcción ligero y de gran resistencia inventado por el ingeniero austríaco Ludwig Hatschek. La grave preocupación que creaba la protección contra incendios determinó una vez más que la invención de Hatschek tuviera una inmediata resonancia. Otros constructores no tardaron en obtener varios productos afines a partir de la fórmula básica de Hatschek, entre ellos tejas de pizarra sintética, paneles rugosos para paredes y tejados y molduras decorativas de muros y techos.

En la primera mitad de este siglo los productos que incorporaban amianto se contaban por docenas. Se construían barcos a prueba de incendios con planchas de amianto y cemento y se utilizaban mezclas de plásticos y amianto en botones, teléfonos y cuadros eléctricos. Y, por supuesto, la industria del plástico se apoyó desde el primer momento en combinaciones con amianto, cuyas fibras reforzaban el material, reducían su peso y mejoraban su resistencia térmica. Incluso cuando los nuevos materiales poliméricos comenzaron a dominar el mercado, el amianto continuó siendo un agente importante que les daba cohesión y resistencia. La baldosa de vinilo-amianto, por ejemplo, desempeñó un papel primordial en la industria de pavimentos. Todavía hoy siguen vendiéndose zapatas de freno de automóvil con amianto en talleres de Estados Unidos, por me-



Anuncio del amianto hacia 1870

1880


1884: patente británica sobre planchas de amianto para la construcción
1885: patente británica sobre membranas de amianto para filtrar substancias de tipo jugoso



En un folleto publicitario de 1894 sobre uso del amianto, titulado "Aislamiento térmico y protección contra incendios en edificios importantes", se mencionaba el Capitolio del Estado de Indiana.

cánicos que no creen que se haya encontrado otro material mejor que lo reemplace.

El hombre de amianto

La aceptación pública del amianto había llegado hacia 1939 a un grado difícilmente superable. En la Exposición Mundial de Nueva York de ese mismo año la compañía Johns-Manville presentó una gran exhibición que celebraba los "servicios a la humanidad" de este material. Los visitantes al pabellón eran acogidos por un gigantesco "hombre de amianto", que exponía con todo detalle las extraordinarias cualidades del mineral. La propia Exposición estaba literalmente envuelta en amianto, desde las cubiertas del techo hasta las tuberías subterráneas.

Frente a tal ola de popularidad, en las vísperas de la Segunda Guerra Mundial la demanda de amianto estaba a punto de sobrepasar la capacidad de producción total. A falta de reservas nacionales adecuadas, las superpotencias militares de todo el mundo tuvieron que depender en gran medida de importaciones del extranjero. Los alemanes intentaron acumular unas reservas suficientes recurriendo a fur-

¿Qué es el amianto?

Se han identificado seis tipos distintos de amianto: actinota, amosita, antofilita, crocidolita, tremolita y crisotila. Todos ellos contienen largas cadenas de silicio y oxígeno, responsables de la naturaleza fibrosa del mineral. Pero son muy diferentes en cuanto a propiedades físicas y químicas, dependiendo de los demás componentes de la roca, como el calcio, el magnesio o el hierro.

Las fibras incombustibles de amianto son más resistentes que el acero y muy elásticas, lo que les da un gran atractivo para un amplio campo de aplicaciones industriales. Sin embargo, la elasticidad y la resistencia del amianto también le hacen peligroso para la salud humana. Las fibras de amianto pueden penetrar los tejidos corporales, especialmente los pulmones, llegando finalmente a desarrollar tumores.

Las cinco primeras variedades antes citadas (llamadas anfibólicas) son, con mucho, las más resistentes y rígidas, y también las más peligrosas. Los dos tipos anfibólicos más comunes, la amosita y la crocidolita, que suelen denominarse amianto "marrón" y "azul", respectivamente, provienen de las minas de Sudáfrica y se mezclaban con aislantes y cemento hasta que su empleo fue prohibido legalmente. Las restantes variedades anfibólicas —antofilita, tremolita y actinota— nunca tuvieron valor comercial.

El sexto tipo de amianto, la crisotila, llegó a suponer el 95 por ciento de todo el amianto utilizado en el mundo. La crisotila difiere marcadamente en textura, composición y comportamiento de las otras variedades. Su estructura cristalina se asemeja a una serpiente (de ahí su otro nombre, "serpentina"), y es bastante más suave y flexible que los otros tipos de mineral. Por ser más suave, el tejido corporal puede deshacerlo con más facilidad y sufrir así menos daño que con los restantes.

En Estados Unidos se estima que un veinte por ciento de los edificios contiene productos basados en crisotila, como tejas, tuberías de cemento y aislamientos. El amianto de edificación, si está bien conservado, no desprende espontáneamente fibras al aire. En cambio, la degradación, la renovación y la demolición de las estructuras pueden liberar las perjudiciales fibras. Por si fuera poco, la mayoría de los estudios indican que los niveles de amianto que tiene el aire dentro de los edificios —incluso cuando se ha alterado el amianto original— son mucho menores que lo exigido por las actuales normas sanitarias de EE.UU. para protección de los trabajadores.

—J.E.A. y B.T.M.



CRISOTILA

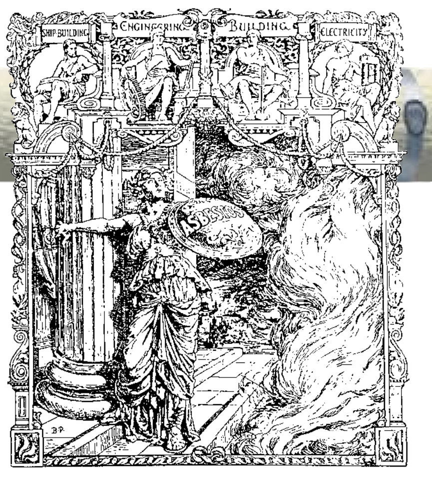


CROCIDOLITA

AMOSITA

1900

1920



La Dama de Amianto, de un folleto publicitario de principios del siglo XX

Los teléfonos y diversos artículos del hogar estaban fabricados de una mezcla de amianto y plástico.



Los automóviles tenían las zapatas de los frenos de amianto.

Inglaterra promulgó en 1931 una Reglamentación de la industria del amianto para combatir los daños pulmonares causados por la exposición al amianto, sobre todo en los obreros de la industria textil.

El Hombre de Amianto, de la Exposición Mundial de 1939

tivos envíos desde Sudáfrica. Durante algún tiempo los Aliados temieron que Alemania hubiera encontrado un sustituto químico del amianto, pero más tarde las investigaciones secretas de la CIA desmintieron tales rumores.

Estados Unidos consideró muy vulnerable su dependencia de posibles suministradores extranjeros de amianto, como el programa de intercambio acordado entre EE.UU. y la Unión Soviética por el empresario Armand Hammer y el líder soviético Lenin. Las explotaciones mineras canadienses se esforzaron por satisfacer las demandas de EE.UU., al tiempo que el gobierno imponía severas restricciones en el ámbito nacional a las aplicaciones no esenciales. Día tras día había que suministrar cientos de toneladas para motores de buques, piezas de vehículos militares, cascos de bazuca y torpedos, bengalas de paracaídas y tantos otros artefactos que contenían amianto; los médicos de campaña también lo utilizaban en ropa quirúrgica de fácil esterilización.

La fuerte expansión de la construcción después de la Segunda Guerra Mundial provocó el siguiente, y quizás el último, tirón del amianto. Los técnicos de estructuras valoraron muy positivamente la resistencia, la duración y la resistencia al fuego de los productos de cemento-amianto y los utilizaron generosamente en sus proyectos. Los altos rascacielos fueron en parte posibles gracias a un nuevo revestimiento de amianto pulverizado que protegía las estructuras de acero contra pandeos causados por los incendios.

Las singulares propiedades del amianto abrían un impresionante abanico de aplicaciones. Las sacas postales ignífugas de Estados Unidos iban tejidas con fibra de amianto. Para purificar zumos de fruta, vinos y azúcares se utilizaban filtros de amianto. Los cirujanos cardiólogos lo empleaban como hilo de sutura y hasta se elaboró una pasta dentífrica con estas fibras. La arcilla de modelar y la nieve artificial también contenían amianto. Incluso Hollywood sacó al proscenio este material por dos veces, una en el ardiente palo de escoba de la Malvada Bruja del Oeste en *El mago de Oz*, y otra en las telas de araña artificiales que colgaban sobre una antigua cueva egipcia revitalizada en *La momia*.

Aumentan los temores por la salud

Cuando se estableció la Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos en 1970, el amianto se había comercializado en millares de productos. Su utilización anual en este país seguiría ascendiendo otros tres años más hasta alcanzar un máximo absoluto en 1973, con cerca de un millón de toneladas. Pero muy poco después la historia del amianto dio un viraje negativo, obedeciendo a la creciente preocupación por la salud humana.

La verdad es que desde principios de siglo se habían observado problemas derivados de la inhalación de amianto en grandes concentraciones, como sucedía en hilaturas y factorías. Los informes sobre lesiones fibróticas de los pulmones, la denominada asbestosis, en las polvorientas fábricas textiles inglesas condujo a promulgar los Reglamentos industriales del amianto en 1931. Durante unos cuantos decenios, sin embargo, este hecho no llamó mucho la atención en los medios de sanidad laboral, todavía en mantillas, pese a que las investigaciones médicas habían descubierto además un inquietante nexo entre el amianto y el cáncer de pulmón, especialmente en los fumadores.

La actitud general comenzó a cambiar a mediados de los sesenta, al descubrirse que incluso los niveles bajos de amianto planteaban notables riesgos para la salud. Esto implicaba que había un número mucho mayor de personas en peligro de lesión pulmonar, incluyendo los miles de ellas que trabajaron en el aislamiento de barcos durante la Segunda Guerra Mundial. Los preocupantes resultados recogidos por todo el mundo apuntaban a la clase de amianto denominado anfíbol como el principal culpable de originar el mesotelioma, tumor que aparece en el pecho o los intestinos. En respuesta a tales revelaciones, la mayoría de los países industrializados impusieron regulaciones que limitaban la exposición a este tipo de amianto solamente. Pero ante la creciente presión de los sindicatos y la ominosa predicción de más de un millón de víctimas, el gobierno de EE.UU. decidió regular la familia del amianto en su conjunto.

Aunque la prohibición de la Agencia de Protección Medioambiental relativa a todo tipo de amianto fue levantada en 1991, el clima político y legal que rodea el uso del amianto en EE.UU. está todavía agitado. Pocos son los que recuerdan las glorias anteriores de este mineral, y todavía son menos los que imaginan que alguna vez retorne su uso generalizado. Por mucho que las generaciones pasadas hayan considerado el amianto como un recurso

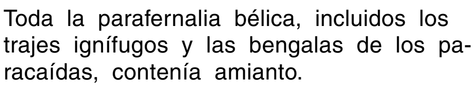


1940

La Malvada Bruja del Oeste aparecía en la película de 1939 *El mago de Oz* con una escoba de amianto.



Los proyectos de construcción de la posguerra utilizaban mucho el amianto.

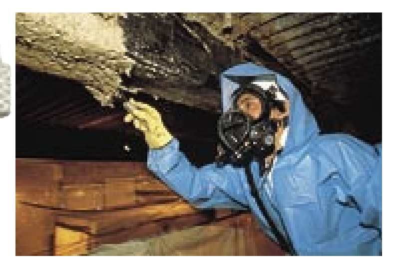


Toda la parafernalia bélica, incluidos los trajes ignífugos y las bengalas de los paracaídas, contenía amianto.

La preocupación por la salud empezó a aflorar en EE.UU. durante los años sesenta, cuando los estudios revelaron que los bajos niveles de exposición al amianto podrían ser más peligrosos de lo que se había pensado.

1970

La utilización del amianto alcanzó su máximo absoluto en EE.UU. en 1973.



Prosigue la eliminación del amianto de escuelas, casas y edificios públicos.

1980

Los propulsores de combustible sólido de la lanzadera espacial van aislados con amianto, siendo una de las numerosas aplicaciones actuales de este mineral.



1990

valiosísimo, la actual preocupación por la salud oscurece, cuando no borra, tal recuerdo.

Se considera una locura sostener que el amianto siga ostentando cualidades que le redimen de todos estos pecados y absolutamente ridículo clasificarlo como producto esencial y de valor estratégico mundial. Y, sin embargo, tal es la realidad. La variedad de amianto denominada crisotila (más suave y menos peligrosa que el anfíbol), por ejemplo, sigue siendo un mineral esencial para muchas aplicaciones de enorme interés, por lo que el gobierno norteamericano mantiene hasta la fecha reservas almacenadas para uso militar.

En el programa de la lanzadera espacial puede hallarse una confirmación de la importancia que conserva el amianto. Cada uno de los cohetes propulsores de combustible sólido de la nave espacial lleva un revestimiento de caucho impregnado de amianto para proteger la cubierta de acero del calor del despegue. (La utilización del amianto en aeronáutica comenzó a finales del siglo pasado, cuando se intentaba desarrollar un globo de aire caliente a prueba de incendios. En el Museo Aeroespacial de la Smithsonian Institution puede hoy contemplarse una réplica de un cohete primitivo, que va revestido de amianto para protegerlo de un fallo estructural catastrófico, en abierto desafío a las actuales exigencias de retirar el amianto de todas las zonas expuestas al público.)

El amianto desempeña también un papel vital en las operaciones de las fuerzas submarinas de la Armada estadounidense. Este tipo de naves no podrían funcionar si carecieran de medios autónomos de producción de oxígeno; las células electrolíticas que extraen oxígeno de las moléculas de agua llevan como componente esencial una esterilla tejida con fibra de amianto.

También nos encontramos con el amianto más a la mano. Al menos el 75 por ciento del cloro utilizado para blanquear, limpiar y desinfectar proviene de la industria química, cuyos procesos de fabricación dependen de productos con amianto. De hecho, la propia agua que bebemos podría muy bien haber sido tratada con cloro obtenido a través de amianto, así como haber llegado a nuestras casas por canalizaciones de cemento-amianto. La longitud de tubería de cemento-amianto utilizada desde 1930 sólo en EE.UU. bastaría para dar ocho veces la vuelta al mundo, ir a la Luna y regresar.

Una perspectiva racional

También es verdad que estas aplicaciones actuales (que suelen utilizar la variedad crisotila, más segura) no requieren enormes cantidades de amianto. A pesar de todo el consumo de amianto en EE.UU. ha caído en un 95 % desde el pico alcanzado en 1973. Muchas naciones siguen considerando la crisotila como recurso importante. En 1997 se procesarán en todo el mundo más de dos millones de toneladas de este material, en su mayoría mezclado en productos de cemento-amianto para la construcción, que se utilizarán en Asia, Europa del Este y países en desarrollo.

Es probable que el amianto nunca vuelva a provocar el entusiasmo de antaño. Mirando hacia atrás, sin embargo, se aprecia que los esfuerzos para erradicar el amianto han sido en cierta medida mal interpretados y han estado mal encauzados. Las predicciones de índices de mortalidad

por exposición a la fibra de amianto, tanto en interiores como en exteriores, parecen ahora ridículas si se comparan con los riesgos que entraña el fumar tabaco o el abuso del alcohol y las drogas. La tan difundida como sensiblera advertencia de que “una fibra puede matar” sobrepasó muy probablemente los límites de la verdad científica y desencadenó una purga del amianto en las escuelas y otros edificios, con resultados dudosos en demasiados casos.

En el deseo de conseguir un enfoque racional del debate sobre el amianto, la Agencia de Protección Medioambiental estadounidense se unió al Congreso y a otras instituciones privadas afectadas por el tema, para pedir a una respetada organización no lucrativa, el Instituto de Efectos Sanitarios, una evaluación independiente de este dilema. El informe que elaboró dicha entidad intentaba educar al público acerca de las falsedades y consecuencias económicas de una agresiva eliminación del amianto. La Asociación Médica Americana publicó un informe en 1991 que llegaba a conclusiones similares. Ambos documentos ponían de relieve que la contaminación de amianto actual es extremadamente baja comparada con los niveles alcanzados en lugares de trabajo, fuera de todo control, que originaron enfermedades pulmonares.

Puede que el futuro mundial del amianto dependa tanto del suministro como de la seguridad. Del mismo modo que un día se agotaron las antiguas minas de amianto griegas, las reservas actuales se están acabando. Se lleva mucho tiempo buscando substitutivos, pero aún no se ha encontrado una solución perfecta.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ASBESTOS: SCIENTIFIC DEVELOPMENTS AND IMPLICATION FOR PUBLIC POLICY. B. T. Mossman, J. Bignon, M. Corn, A. Seaton y J. B. L. Gee en *Science*, vol. 247, páginas 294-300; 19 de enero de 1990.

ASBESTOS: A CHRONOLOGY OF ITS ORIGINS AND HEALTH EFFECTS. R. Murray en *British Journal of Industrial Medicine*, vol. 47, n.º 6, págs. 361-365; junio de 1990.

THE SCHOOLROOM ASBESTOS ABATEMENT PROGRAM: A PUBLIC POLICY DEBACLE. M. Ross en *Environmental Geology*, vol. 26, n.º 3, páginas 182-188; octubre de 1995.

Abonos nitrogenados

La alimentación de la humanidad actual obliga a utilizar gran cantidad de fertilizantes químicos. Se ha modificado así la distribución del nitrógeno sobre la Tierra de forma drástica y a veces peligrosa

Vaclav Smil

Durante el siglo veinte la humanidad casi ha cuadruplicado su número. Aunque son muchos los factores que han favorecido esta expansión sin precedentes, no hubiera podido continuar en los últimos decenios de no haber existido una actividad muy extendida, pero poco apreciada, como es la síntesis de amoniaco. La disponibilidad de amoniaco, y de los fertilizantes nitrogenados que de él se derivan, ha eliminado de manera efectiva lo que siempre fue la mayor limitación para la producción de alimentos. Que la población mundial actual tenga suficientes alimentos (por término medio) se debe a muchos avances de las prácticas agrícolas modernas. Pero a quien la humanidad tiene que agradecer básicamente esta abundancia es a una industria química clave: la que produce abonos nitrogenados.

¿Por qué es tan importante el nitrógeno? Si se le compara con el carbono, el hidrógeno o el oxígeno, no es más que un constituyente minoritario de la materia viva. Pero mientras que los tres primeros pasan fácilmente de sus enormes reservas naturales a los tejidos vivos, a través de los alimentos y del agua consumidos, la mayor parte del nitrógeno permanece bloqueada en la atmósfera. El nitrógeno que pueden absorber directamente las plantas, los animales y los seres humanos es una parte ínfima.

A pesar de lo cual tiene una importancia decisiva. Es necesario para el ADN y el ARN, las moléculas que almacenan y transfieren la información genética, así como para la fabricación de proteínas, los omnipresentes mensajeros, receptores, catalizadores y componentes estructurales de todas las células vegetales y animales. Los seres humanos, como otros animales superiores, no pueden sintetizar estas moléculas utilizando el nitrógeno del aire y obtienen los compuestos nitrogenados mediante los alimentos. Esta aportación es insustituible y se necesita una cantidad mínima para una nutrición adecuada (en forma de proteínas animales o vegetales). Pero a los cultivos tampoco les resulta fácil obtener el nitrógeno de la atmósfera.

Hay que achacar la escasez relativa de nitrógeno utilizable a su peculiar comportamiento químico. Las moléculas de nitrógeno (que son pares de átomos) constituyen el 78 % de la atmósfera, pero son tan estables que resulta difícil convertirlas a una forma reactiva absorbible por las plantas. Las descargas eléctricas atmosféricas disocian estas moléculas tan enlazadas, pero la mayor parte de la “fijación” natural del nitrógeno (es decir, la fragmentación de sus moléculas y su conversión en amoniaco, compuesto químicamente reactivo) la llevan a cabo ciertas bacterias. Las más importantes pertenecen al género *Rhizobium*, simbiontes que crean nódulos en las raíces de las plantas



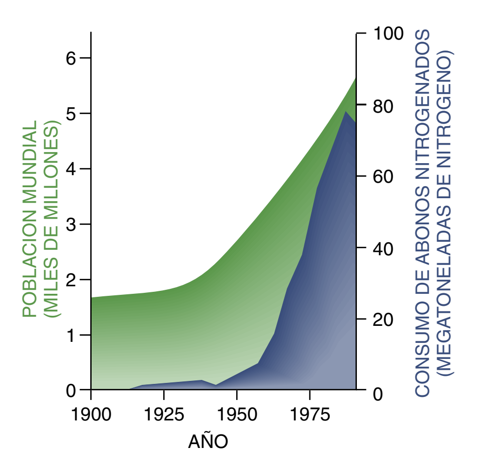
leguminosas, ya sean de pequeño porte, como las judías, o árboles, como las acacias. También lo hacen, en menor grado, las cianobacterias (que unas veces viven independientemente y otras asociadas con ciertas plantas).

Un problema antiguo

Diversos fenómenos naturales y los cultivos agrícolas eliminan continuamente del suelo el nitrógeno fijado, por lo que suele haber escasez del mismo. Lo que tradicionalmente hacían los agricultores de las sociedades preindustriales era compensar esta pérdida o absorción de nitrógeno de los campos con residuos de otras cosechas o desechos animales y humanos. La concentración de nitrógeno en estas sustancias es pequeña, por lo que era necesario aplicar enormes cantidades para dotar al suelo de la porción suficiente.

También sembraban guisantes, judías, lentejas y otras legumbres con los cereales y demás cultivos. Las bacterias fijadoras de nitrógeno que viven en las raíces de las primeras fertilizaban los campos. A veces las legumbres se cultivaban por esta única razón, como pasaba en Asia con el helecho *Azolla*, que alberga cianobacterias fijadoras de nitrógeno. Después araban los campos y enterraban las plantas, que actuaban así como "abonos verdes", sin que se cosechase alimento alguno de ellas. Este tipo de agricultura orgánica adquirió su mayor desarrollo durante la primera parte de nuestro siglo en Java, en el delta del Nilo, en el noroeste de Europa (especialmente en las explotaciones agrícolas holandesas) y en muchas regiones de Japón y China.

La combinación del reciclado de residuos humanos y animales con el cultivo de abonos verdes puede proporcionar unos 200 kilos de nitrógeno por hectárea de tierra agrícola. Los 200 a 250 kilos de proteínas vegetales que pueden conseguirse de esta manera fijan el límite teórico de la densidad de población: una hectárea de terreno agrícola en lugares con buena tierra, humedad adecuada y un clima templado, que permita el cultivo continuo a lo largo del año,

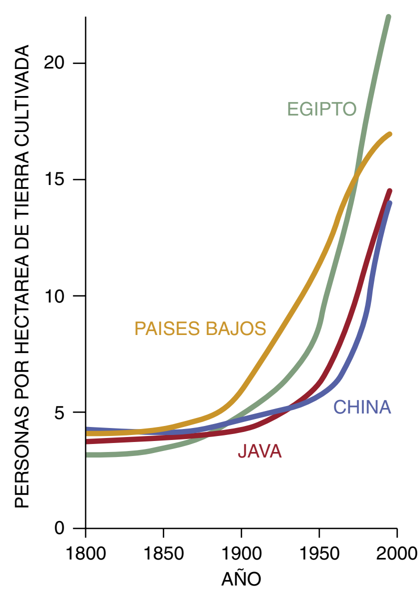


2. EL CRECIMIENTO REPENTINO del consumo mundial de abonos nitrogenados durante el siglo XX ha ido acompañado por un incremento paralelo de la población mundial.



1. LA AGRICULTURA INTENSIVA, como la practicada en los campos escoceses de abajo, depende de la producción industrial de fertilizantes nitrogenados, que se fabrican mediante una técnica puesta a punto en los años veinte de nuestro siglo. Este proceso lo utilizan en la actualidad innúmeras fabricas de amoniaco repartidas por todo el mundo.





3. LA DENSIDAD DE POBLACION no aumentó sustancialmente en los países que aplicaban una agricultura intensiva más que tras la generalización del uso de los abonos nitrogenados.

debería ser capaz de mantener hasta quince personas.

En la práctica, sin embargo, las densidades de población de los países que vivían de la agricultura orgánica eran siempre mucho menores. La media de China estuvo entre cinco y seis personas por hectárea de tierra cultivable durante la primera mitad de este siglo. Durante los últimos decenios de agricultura orgánica pura en Japón (cosa que ocurría aproximadamente al mismo tiempo), la densidad de población fue ligeramente superior a la de China, pero el consumo japonés de pescado marino hace más complicada la comparación entre ambas naciones. Una densidad de población de alrededor de cinco personas por hectárea fue también típica de las regiones agrícolas fértiles del noroeste de Europa durante el siglo XIX, cuando los agricultores aplicaban exclusivamente los métodos tradicionales.

El límite práctico de unas cinco personas por hectárea de tierra cultivada tenía varias causas, entre las que se incluyen las presiones medioambientales (plagas y mal tiempo) y la necesidad de cultivar especies no alimenticias, como las que proporcionaban medicinas o fibras, por ejemplo. Pero la dificultad principal provenía del ciclo cerrado del nitrógeno. La agricultura tradicional se enfrentaba a un problema fundamental, que era especialmente acusado en países con escasez de tierra, sin áreas libres de cultivo que pudieran utilizarse para el pastoreo o para la expansión de la agricultura. La única manera que tenían los agricultores de estos lugares para superar las limitaciones del ciclo del nitrógeno local e incrementar las cosechas era plantar más abonos verdes, lo que impedía la siembra de un cultivo alimenticio. Más conveniente era la rotación de los cereales habituales con leguminosas comestibles, pero incluso esta práctica, tan habitual en la agricultura tradicional, tenía sus límites. Por una parte, las cosechas de legumbres son poco abundantes; por otra, las legumbres son de digestión dificultosa y no es fácil hacer con ellas pan o fideos. La consecuencia es que pocos de los cultivos sembrados según los métodos ancestrales contaban con una provisión adecuada de nitrógeno.

Un lugar fértil para la ciencia

A medida que aumentaban sus conocimientos de química, los científicos del siglo XIX empezaron a comprender el papel esencial que representaba el nitrógeno en la producción de alimentos y la escasez de sus formas utilizables. También aprendieron que los otros dos nutrientes decisivos —el potasio y el fósforo— limitaban menos el rendimiento agrícola, al tiempo que era mucho más fácil compensar cualquier deficiencia que se produjera en su concentración. Era relativamente sencillo explotar los yacimientos de potasa para obtener abonos potásicos, mientras que el enriquecimiento de fósforo no requería más que tratar con ácido los minerales fosfatados para convertirlos en compuestos más solubles, que las raíces absorberían junto con el agua. No se disponía, en cambio, de procedimientos tan simples para el nitrógeno, por lo que a finales del siglo pasado los agrónomos y los químicos sentían cierta urgencia y malestar, conscientes de que la explotación agrícola cada vez más intensa se enfrentaba a una amenazante crisis del nitrógeno.

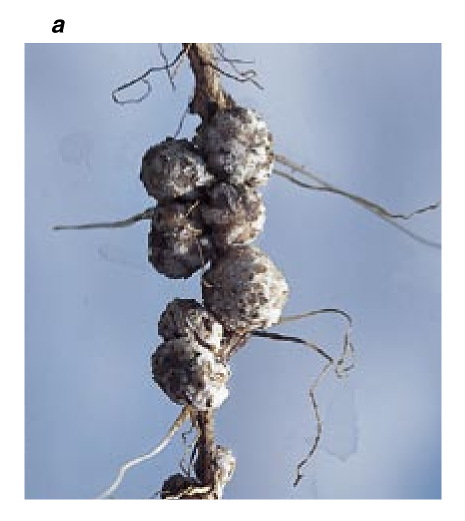
Se intentaron varias maneras de superar la barrera del nitrógeno. El uso de nitratos inorgánicos solubles (procedentes de los yacimientos encontrados en los desiertos chilenos) y el guano orgánico (procedente de excrementos de ave depositados en las áridas Islas Chincha en Perú) supusieron un alivio transitorio para algunos agricultores. La recuperación del sulfato amónico de los hornos utilizados para transformar el carbón en coque metalúrgico contribuyó tam-

	N_2 DINITROGENO	NH_3 AMONIACO	$CO(NH_2)_2$ UREA	AMINOACIDOS	PROTEINAS
MODELO TRIDIMENSIONAL					
PORCENTAJE DE NITROGENO	100%	82%	47%	8%–27%	~16%
ABUNDANCIA EN LA BIOSFERA (MILES DE MILLONES DE TONELADAS)	10.000	10	0,01	10	1

NITROGENO HIDROGENO OXIGENO CARBONO AZUFRE

4. LOS PRODUCTOS nitrogenados saturan la biosfera. La forma más abundante (N_2), que constituye el 78 % de la atmósfera, está tan fuertemente enlazada que no interviene en la mayoría de las reacciones químicas. Las plantas necesitan compuestos de nitrógeno reactivos, como el amoniaco (NH_3) y la urea ($CO[NH_2]_2$), que son mucho más escasos. (Las estimaciones mostradas tienen un margen de error de 10 veces.) Las plantas utilizan estas sustancias para formar aminoácidos, con los que se construyen las proteínas, que participan a su vez en miríadas de funciones de las células vivas.

a



b



c



5. LAS BACTERIAS FIJADORAS DE NITROGENO, los microrganismos que convierten el nitrógeno atmosférico en derivados reactivos, viven en los nódulos radiculares de las plantas leguminosas, como la soja (*a*). También se pueden encontrar en los helechos *Azolla* (b) y dentro de las plantas de caña de azúcar (*c*).

bién durante algún tiempo al aporte de nitrógeno para la agricultura. Este proceso cianamídico —en el que el coque reacciona con cal y nitrógeno puro para producir un compuesto que contiene calcio, carbono y nitrógeno— se comercializó en Alemania en 1898, pero consumía demasiada energía para que resultara práctico. También la producción de óxidos de nitrógeno haciendo saltar chispas eléctricas en una mezcla de los dos elementos requería cantidades enormes de energía. Sólo Noruega, donde la energía era barata por sus disponibilidades hidroeléctricas, empezó a fabricar abonos nitrogenados mediante este proceso en 1903, pero el rendimiento total seguía siendo pequeño.

La auténtica revolución fue la invención de la síntesis de amoniaco. Carl Bosch inició el desarrollo de este proceso en 1899 en la BASF, empresa química líder de Alemania. Pero fue Fritz Haber, de la Universidad Técnica de Karlsruhe, quien ideó un proyecto factible para sintetizar amoniaco a partir de nitrógeno e hidrógeno, combinándolos a una presión de 200 atmósferas y a una temperatura de 500 grados Celsius en presencia de catalizadores de osmio sólido y de uranio.

El método de Haber funcionaba bien, pero la conversión de esta reacción de laboratorio en una realidad industrial suponía un enorme reto. Bosch terminó por resolver el principal problema de diseño: el deterioro del acero del interior de la cámara de reacción por las grandes temperaturas y presiones. Sus trabajos condujeron directamente a la primera fábrica de amoniaco comercial, que se levantó en Oppau, Alemania, en 1913. El rendimiento inicialmente proyectado se dobló pronto a 60.000 toneladas al año, que bastaban para hacer autosuficiente a Alemania en los compuestos nitrogenados utilizados para la producción de explosivos durante la primera Guerra Mundial.

Los problemas económicos imperantes durante el período de entreguerras dificultaron la comercialización del proceso de síntesis Haber-Bosch. La producción global de amoniaco se mantuvo por debajo de cinco millones de toneladas hasta finales de los años cuarenta. El uso de fertilizantes nitrogenados aumentó poco a poco durante el decenio siguiente, llegando a alcanzar los 10 millones de toneladas; las innovaciones técnicas introducidas durante los años sesenta redujeron el consumo de electricidad de la síntesis en más del noventa por ciento, lo que permitió instalaciones de producción de amoniaco mayores y más económicas. El posterior crecimiento exponencial de la demanda incrementó ocho veces la producción global de este producto a finales de los años ochenta.

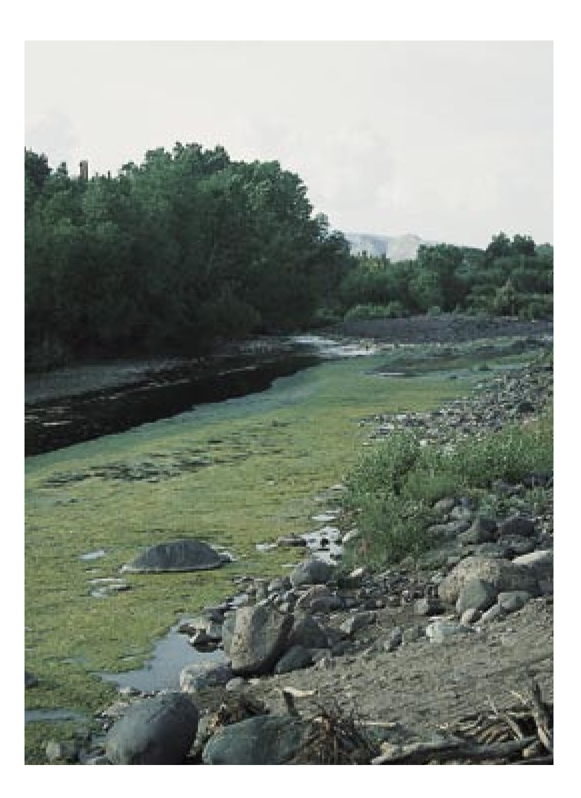
A este incremento le acompañó un cambio de papeles bastante rápido entre los países económicamente fuertes y los débiles por lo que se refiere al uso del nitrógeno. Durante la primera parte de los años sesenta las naciones acaudaladas representaban alrededor del noventa por ciento del consumo total de fertilizantes, porcentaje que había caído por debajo del setenta por ciento hacia 1980. Los niveles de consumo de los mundos desarrollado y en vías de desarrollo se igualaron en 1988, mientras que actualmente es el segundo grupo de países el que utiliza más del sesenta por ciento de la producción total de abonos nitrogenados.

¿Hasta qué punto se ha vuelto dependiente la humanidad de la producción de abonos nitrogenados sintéticos? Esta pregunta tiene difícil respuesta, pues lo que sabemos sobre las aportaciones y las extracciones de nitrógeno de los campos de cultivo mundiales es poco preciso. Una valoración cuidadosa de las distintas aportaciones indica que alrededor de 175 millones de toneladas de nitrógeno fluyen hacia las tierras de cultivo mundiales cada año. Las plantas utilizan como la mitad de esta cantidad, representando los abonos sintéticos un cuarenta por ciento aproximadamente del nitrógeno total absorbido por los cultivos. Y puesto que este tipo de plantas proporciona las tres cuartas partes del nitrógeno de las proteínas que consumimos —ya sea directamente o a través de los alimentos de origen animal—, alrededor de un tercio de las proteínas de la dieta humana dependen de los abonos nitrogenados sintéticos. La carne y los productos lácteos derivados del pastoreo, así como el pescado, contienen las proteínas restantes.

Estos datos sobreestiman de alguna manera la importancia del proceso Haber-Bosch. Los abonos nitrogenados no se necesitaron para que Europa y Norteamérica asegurasen la supervivencia y hasta la adecuada nutrición de sus pobladores. El gran uso que en ellas se hace de fertilizantes sintéticos responde al deseo de fabricar pienso para la ganadería, que a su vez ha de satisfacer la preferencia mayoritaria por los alimentos de origen animal, de gran contenido proteínico. Incluso

ACTIVIDADES HUMANAS
COMBUSTIBLES FOSILES
FERTILIZANTES
ALIMENTOS, FIBRAS MADERA
RESIDUOS ORGANICOS
ATMOSFERA
NO_2
N_2
NH_3, NH_4^+
NO
NO_3^-
N_2O
SUELO
PLANTAS
DIAZOTROPOS
NO_3^-
NO_2^-
SUELO, MATERIA ORGANICA
NH_3, NH_4^+
AGUAS
NO_3^-
MATERIA ORGANICA
NH_4^+
SEDIMENTOS

6. EXISTEN RESERVAS DE NITROGENO de muchas clases: en el suelo, en el agua, en la atmósfera y en la cubierta biológica de la Tierra. El nitrógeno asume diferentes formas cuando pasa de unas a otras. El advenimiento de la producción de fertilizantes en gran escala ha modificado enormemente el flujo natural de este elemento, desequilibrando su ciclo de manera a veces preocupante, aunque posibilite la alimentación de la humanidad actual.



7. LA EUTROFIZACION se produce en las aguas cargadas de fertilizantes, pues el exceso de nitrógeno estimula el crecimiento de las algas.

si se redujese a la mitad el porcentaje de proteínas que consumen (persuadiendo a la gente de que comiera menos carne, por ejemplo), la nutrición de norteamericanos y europeos seguiría siendo adecuada.

Pero, por otro lado, la afirmación de que un tercio de las proteínas que nutren a la humanidad depende de los abonos sintéticos infravalora su importancia. Son muchos los países en los que coinciden la escasez de tierras con la gran densidad de población; en ellos la supervivencia depende de los abonos sintéticos. Conforme se agotan las nuevas áreas de cultivo y las prácticas agrícolas tradicionales llegan a su límite, la gente de estos países tiene que aumentar continuamente la aplicación de fertilizantes nitrogenados, aunque sus dietas contengan comparativamente poca carne. Pertenece a este grupo cualquier nación que produzca anualmente más de 100 kilogramos de proteínas por hectárea, aproximadamente. China, Egipto, Indonesia, Bangladesh, Pakistán y Filipinas son casos típicos.

Abuso de una cosa buena

La aportación de grandes cantidades de nitrógeno reactivo a los suelos y a las aguas tiene muchas consecuencias nocivas para el medio ambiente, problemas que van desde los sanitarios de determinadas regiones hasta cambios que afectan a todo el planeta y se extienden, en sentido muy literal, desde las profundidades de la Tierra hasta las alturas estratosféricas. Los grandes niveles

VACLAV SMIL estudió en la Universidad Carolinum de Praga en la República Checa, y en la Universidad del Estado de Pennsylvania. Actualmente es catedrático en el departamento de geografía de la Universidad de Manitoba en Canadá. La investigación interdisciplinaria que lleva a cabo Smil abarca las interacciones entre el medio ambiente, la energía, los alimentos, la población, las fuerzas económicas y la política.

El curioso destino de Fritz Haber



FRITZ HABER recibió el Premio Nobel de Química después de haber sido considerado un criminal de guerra.

Aunque fue galardonado con el Premio Nobel en 1919 por la síntesis del amoniaco, la vida de Fritz Haber fue esencialmente trágica. Como director que era del Instituto Kaiser Wilhelm de Química Física durante la primera Guerra Mundial, desarrolló el uso de gas de cloro por encargo de las autoridades alemanas. Haber creía que esta arma terrible ayudaría a conseguir una victoria rápida y así evitaría sufrimientos mayores. No faltaron quienes desaprobaron sus investigaciones. En vísperas de la primera utilización del gas contra las tropas aliadas en 1915, su esposa se suicidó, atormentada por la horrorosa contribución de su marido a la guerra. Después del armisticio los aliados le consideraron un criminal de guerra. Aunque estaba desmoralizado, Haber continuó investigando. El posterior auge del antisemitismo de inspiración nazi en Alemania le hizo huir y fijar su residencia en Inglaterra, dada su estirpe judía. Murió en 1934 en Basilea, Suiza. —*V.S.*

LOS ATAQUES CON GAS durante la primera Guerra Mundial causaron un enorme número de bajas entre las tropas aliadas.

de nitratos pueden originar metahemoglobinemia, una afección infantil mortal, también conocida como la enfermedad de los “niños azules”; se les ha relacionado también epidemiológicamente con algunos cánceres. La lixiviación de los nitratos, que son muy solubles y pueden contaminar severamente tanto los suelos como las aguas superficiales de las zonas donde se abone intensamente, es un asunto que viene perturbando las regiones agrícolas desde hace más de treinta años. El agua de los pozos del “cinturón del maíz” americano y las aguas subterráneas de muchas partes de Europa occidental presentan una peligrosa acumulación de nitratos. Concentraciones que exceden con mucho los límites legalmente autorizados aparecen no sólo en los arroyuelos que drenan las áreas de cultivo, sino también en ríos principales, como el Mississippi o el Rin.

El nitrógeno que termina llegando a las lagunas, los lagos y las bahías oceánicas suele causar eutrofización, es decir, la abundancia en las aguas de un nutriente cuya concentración previa era escasa. El resultado es que las algas y las cianobacterias encuentran pocas restricciones para crecer; su posterior descomposición priva de oxígeno a otras criaturas y produce la reducción (o la eliminación) de determinadas especies de peces y crustáceos. La eutrofización constituye una plaga de las zonas sobrecargadas de nitrógeno, como son el brazo de mar de Long Island en el estado de Nueva York, la bahía de San Francisco en California o enormes zonas del mar Báltico. La escorrentía superficial de fertilizantes que escapan de los campos de Queensland amenaza con un crecimiento excesivo de algas en algunas partes de la Gran Barrera de arrecife australiana.

Mientras que los problemas de eutrofización se deben a las grandes distancias que pueden recorrer los nitratos disueltos, la persistencia en el suelo de productos nitrogenados provoca también problemas, pues contribuye a la acidificación de muchos suelos cultivables, junto con los compuestos azufrados que se forman durante los procesos de combustión y después precipitan desde la atmósfera. Si no se contrarresta esta tendencia mediante la aportación de cal, la acidificación excesiva puede originar un aumento de la pérdida de oligonutrientes y la liberación hacia los acuíferos de los metales pesados del suelo.

El exceso de fertilizantes no sólo perjudica al suelo y al agua, puesto que el uso creciente de abonos nitrogenados ha contribuido también a enviar más óxido nitroso a la atmósfera. Las concentraciones de este gas, generadas por la acción de las bacterias sobre los nitratos del suelo, son todavía relativamente bajas, pero se trata de un producto que interviene en dos procesos preocupantes. La reacción del óxido nitroso con el oxígeno excitado contribuye a la destrucción del ozono de la estratosfera (donde estas moléculas sirven de pantalla reflectora frente a los peligrosos rayos ultravioleta), mientras que más abajo, en la troposfera, promueve el calentamiento excesivo producido por el efecto invernadero. La vida media del óxido nitroso atmosférico es superior a un siglo, al tiempo que sus moléculas absorben la radiación unas doscientas veces mejor que las de dióxido de carbono.

Todavía hay más perturbaciones atmosféricas debidas a la liberación de óxido nítrico por las bacterias que actúan sobre el nitrógeno de los abonos. El óxido nítrico (producido en cantidades todavía mayores en los procesos de combustión) reacciona con otros agentes contaminantes en presencia de la luz solar y produce una neblina o “smog” fotoquímico. Aunque la deposición de productos nitrogenados procedentes de la atmósfera pudiera tener efectos fertilizantes beneficiosos en algunos bosques y praderas, dosis mayores podrían sobrecargar los ecosistemas sensibles.

Cuando se empezó a sacar partido de los abonos nitrogenados sintéticos no pudo preverse ninguno de estos ultrajes al medio ambiente. Más sorprendente resulta que estas perturbaciones reciban muy poca atención incluso en la actualidad, sobre todo comparada con la que se dedica al aumento del dióxido de carbono en la atmósfera. A pesar de todo, la introducción de nitrógeno reactivo a esta escala significa otro inmenso y peligroso experimento geoquímico, igual que la liberación de dióxido de carbono procedente de los combustibles fósiles.

Del hábito a la adicción

La emisión de dióxido de carbono y la amenaza que trae consigo, el calentamiento global, pueden reducirse mediante una combinación de soluciones técnicas y económicas. Llegará un momento en que disminuya el uso de combustibles fósiles, aunque no se haga para evitar modificaciones climáticas, por el simple hecho de que son recursos limitados e irán siendo más escasos y resultando más caros. No se dispone, en cambio, de medios para hacer crecer los cultivos —y los cuerpos humanos— sin nitrógeno, ni se prevén procesos sustitutivos de la síntesis Haber-Bosch.

Puede que la ingeniería genética llegue a crear bacterias *Rhizobium* simbióticas de los cereales, que pudieran aportarles nitrógeno, o a dotarles directamente de la capacidad fijadora del mismo. Estas soluciones serían ideales, pero no parecen inminentes. Sin ellas, la dependencia humana de los fertilizantes nitrogenados deberá aumentar todavía más para alimentar a los miles de millones de personas adicionales que nacerán antes de que la población mundial termine por estabilizarse.

Una estabilización pronta de la población y la adopción universal de dietas casi vegetarianas podrían restringir las necesidades de nitrógeno, pero ninguna de ellas tiene grandes visos de realizarse. La mayor esperanza de que se reduzca el crecimiento en el uso del nitrógeno consiste en que se encuentren nuevas formas de fertilizar los cultivos. Se obtienen resultados impresionantes cuando los agricultores supervisan la cantidad de nitrógeno utilizable en el suelo para optimizar el momento más adecuado de la aplicación. Pero hay varias tendencias generales que contrarrestan cualquier incremento de eficacia que puedan aportar estas técnicas. La producción de carne continúa aumentando en Latinoamérica y en Asia, crecimiento que demandará todavía más fertilizantes nitrogenados, puesto que se necesitan de tres a cuatro unidades de proteína de pienso para producir una unidad de proteína cárnica.

La comprensión de estas realidades permite una evaluación más clara de las perspectivas de la agricultura orgánica. La rotación de cultivos, la siembra de legumbres, la conservación del suelo (que mantiene más nitrógeno en la tierra) y el reciclaje de los residuos orgánicos son todas ellas técnicas cuyo empleo es deseable, pero no evitarán que se necesiten más abonos nitrogenados en las naciones populosas con escasez de terrenos. Si todos los agricultores intentaran volver a la agricultura puramente orgánica, se descubriría rápidamente que las prácticas tradicionales no son capaces de alimentar a la población actual, por la sencilla razón de que no hay suficiente nitrógeno reciclable para producir alimentos para seis mil millones de personas.

Cuando la Academia Sueca de Ciencias concedió el Premio Nobel de Química a Fritz Haber en 1919, resaltó que había creado “un medio sumamente importante para mejorar las prácticas agrícolas y el bienestar de la humanidad”. Incluso una descripción tan entusiasta parece ahora insuficiente. En la actualidad son por lo menos dos mil millones de personas las que están vivas porque las proteínas de su cuerpo están construidas con nitrógeno procedente de alguna fábrica que ha utilizado este proceso, por la vía de los alimentos vegetales y animales.

Si prescindimos de que la bioingeniería produzca algunos descubrimientos sorprendentes, prácticamente todas las proteínas necesarias para el crecimiento de los otros dos mil millones de personas que nacerán durante las dos generaciones venideras procederán de la misma fuente: la síntesis de amoniaco Haber-Bosch. La humanidad ha adquirido una profunda dependencia química en el lapso de una sola vida.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

POPULATION GROWTH AND NITROGEN: AN EXPLORATION OF A CRITICAL EXISTENTIAL LINK. Vaclav Smil en *Population and Development Review*, vol. 17 n.º 4, páginas 569-601; diciembre, 1991.

NITROGEN FIXATION: ANTHROPOGENIC ENHANCEMENT-ENVIROMENTAL RESPONSE. James N. Galloway, William H. Schlesinger, Hiram Levy II, Anthony Michaels y Jerald L. Schnoor en *Global Biochemical Cycles*, vol. 9, n.º 2, págs. 235-252; junio, 1995.

NITROGEN POLLUTION IN THE EUROPEAN UNION: ORIGINS AND PROPOSED SOLUTIONS. Ester Van der Voet, Rene Kleijn y Udo de Haes en *Environmental Conservation*, vol. 23, número 2, págs. 120-132; 1996.

CYCLES OF LIFE: CIVILIZATION AND THE BIOSPHERE. Vaclav Smil. Scientific American Library, W. H. Freeman and Company, 1997.

El abuelito Hadamard

Prototipo de sabio distraído, el matemático Jacques Hadamard estuvo en el centro de la actividad matemática francesa durante casi un siglo

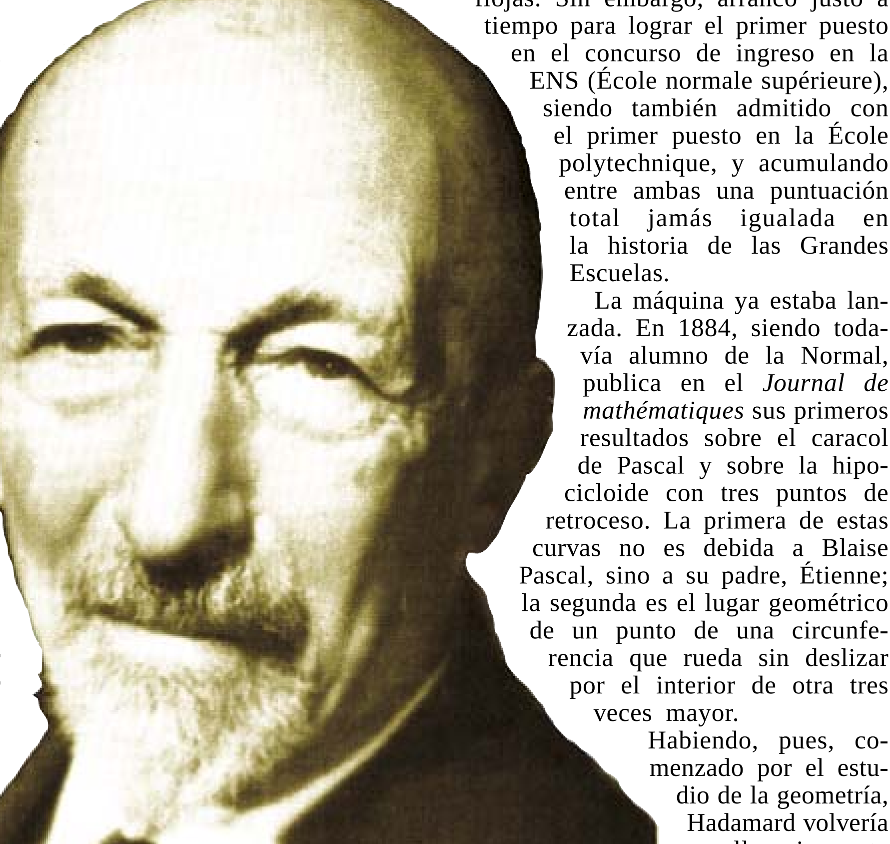
Laurent Schwarz

El talento matemático de Jacques Hadamard era parejo a su enorme afabilidad y a su inmensa entereza de carácter. Republicano, demócrata, militó en favor de Dreyfus cuando éste fue encarcelado (de soltera, la esposa de Dreyfus se apellidaba Hadamard); más tarde formó parte del Comité Central de la Liga por los Derechos del Hombre. Residía en la misma calle donde la Liga tenía su sede y asistía a todas las reuniones de los lunes por la tarde.

Le conocí bien, porque estaba casado con una hermana de mi abuela materna. Puedo dar fe de que era distraído en sumo grado. Un día que Hadamard había salido a pasear por el monte con su hermana, le pidió que se sentara un momento mientras él iba a buscar helechos, que coleccionaba con verdadera pasión. Tras un buen rato de recolectar hierbas, se volvió a casa... habiéndose olvidado por completo de su hermana, que seguía esperando su regreso.

Esta distracción, como veremos, no le abandonó nunca, ni siquiera en los peores momentos; no menos que su pasión por los helechos. Llevaba siempre en el bolsillo una lupa con la que identificar los especímenes; su casa estaba siempre invadida por herbarios.

No iba a la zaga su pasión por las setas; y sin duda su gusto por ellas se debía tanto a sus propiedades gastronómicas como a su interés botánico. En uno de sus viajes al extranjero aprovechó una escala del avión en las Azores para buscar especímenes, que se hizo servir en la comida. Negóselas, en cambio, a su vecino de mesa, que se las pidió, aduciendo que su identificación no era de garantía. Su pasión por la botánica le llevaba a quejarse de que tal disciplina no se enseñase en la escuela, pues les permitiría a los niños hacer ciencia sin necesidad de los conocimientos matemáticos que la física, por ejemplo, exige. No obstante, su pasión por la botánica no lograba jamás hacerle olvidar por completo las matemáticas... Pues Hadamard era, ante todo y sobre todo, un gran matemático.



1. JACQUES HADAMARD (1865-1963)

Profesor mediocre, buen investigador

Hadamard no tuvo una especial predisposición hacia las matemáticas. Nacido en 1865, hijo de un profesor de latín y de una profesora de piano, fue desde el primer momento un alumno brillante y, aunque excelente en las asignaturas "de letras" (consiguió premio extraordinario en griego y en latín), sus calificaciones en matemáticas fueron, inicialmente, flojas. Sin embargo, arrancó justo a tiempo para lograr el primer puesto en el concurso de ingreso en la ENS (École normale supérieure), siendo también admitido con el primer puesto en la École polytechnique, y acumulando entre ambas una puntuación total jamás igualada en la historia de las Grandes Escuelas.

La máquina ya estaba lanzada. En 1884, siendo todavía alumno de la Normal, publica en el *Journal de mathématiques* sus primeros resultados sobre el caracol de Pascal y sobre la hipocicloide con tres puntos de retroceso. La primera de estas curvas no es debida a Blaise Pascal, sino a su padre, Étienne; la segunda es el lugar geométrico de un punto de una circunferencia que rueda sin deslizar por el interior de otra tres veces mayor.

Habiendo, pues, comenzado por el estudio de la geometría, Hadamard volvería a ella cincuenta años después para ocuparse de las geometrías no euclídeas y de sus aplicaciones a las

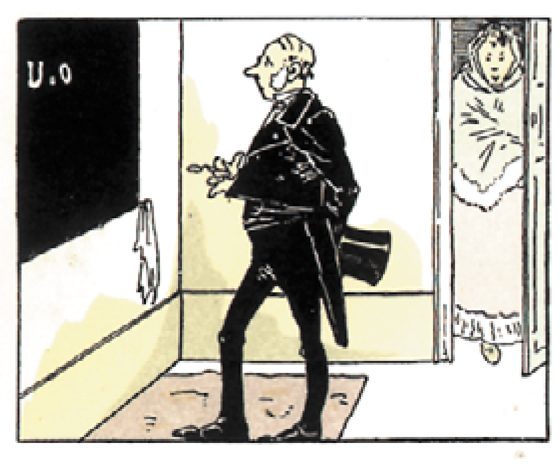
funciones automorfas (por ejemplo, las funciones definidas sobre el círculo y de período igual a $2\pi/3$ son funciones automorfas).

Al terminar la Normal, Hadamard enseñó hasta 1893 en el Liceo Buffon, preparando al mismo tiempo su tesis doctoral, que defiende en 1892. A los 27 años sus trabajos de análisis son ya reveladores de su genio.

Esta tesis se ocupa de las propiedades de las series de Taylor. En el conjunto de los números reales, estas series son sumas de términos de la forma $a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + ...$ La cuestión esencial referente a ellas estriba en conocer el intervalo maximal de centro x_0 (siendo x_0 un número real) en el cual la serie es convergente hacia el valor $f(x)$ de una función f; el intervalo maximal se denomina intervalo de convergencia. Por ejemplo, a la función exponencial $f(x) = e^x$ le corresponde la serie de Taylor de centro $0: 1 + x + x^2/(1 \times 2) + x^3/(1 \times 2 \times 3) + x^4/(1 \times 2 \times 3 \times 4) + ...$, cuyo intervalo de convergencia es la totalidad de la recta numérica real.

A Hadamard le interesaron mucho los desarrollos en serie de Taylor de funciones holomorfas, es decir, de las funciones definidas sobre un conjunto abierto del plano de los números complejos que son derivables en todos los puntos de dicho conjunto (los números complejos tienen la forma $x + iy$, donde x e y son números reales, y donde i es tal que $i^2 = -1$; pueden ser representados por los puntos de un plano). Descubrió la fórmula del radio de convergencia (el radio del mayor disco del plano en el que converge el desarrollo en serie de Taylor), que está dado por el valor recíproco del límite superior, cuando n tiende a infinito, de la raíz n-ésima de los valores absolutos de los coeficientes de la serie.

Por ejemplo, en el caso de la función exponencial generalizada a los números complejos, el desarrollo de Taylor en torno al origen tiene la expresión: $1 + z + z^2/(1 \times 2) + z^3/(1 \times 2 \times 3) + ...$ Los módulos, o valores absolutos, de los coeficientes son 1, 1, 1/2, 1/6, 1/24... A esta sucesión de números le corresponde la sucesión de sus raíces n-ésimas, que son, para n mayor o igual que 1: $\sqrt[1]{1}$, $\sqrt[2]{(1/2)}$, $\sqrt[3]{(1/6)}$... El límite superior de esta sucesión, cuando n tiende a infinito, resulta ser también el límite ordinario, igual a 0, por lo que el radio de convergencia es infinito. Es increíble que fuese preciso esperar hasta Hadamard para obtener este resultado, pues el propio Taylor había estudiado las series que hoy llevan su nombre. Sin embargo, lo que Hadamard trataba de hallar especialmente era información sobre la prolongación analítica de una serie de Taylor en el resto del plano complejo. Terminada su tesis, se interesó por las funciones que son prolongables en



Il fit mieux, un soir qu'il devait conduire deux parentes au bal. A dix heures, l'une de ces dames ayant paru « Mon cousin, dit-elle, il est temps. » Mais Zéphyrin, dont les regards ont rencontré l'ébauche d'un intéressant problème, répond : « Partez devant! Vous ne serez pas au pont Neuf que je vous aurai déjà rattrapées. »

2. EL SABIO COSINUS, personaje caricaturesco de Christophe, nada tenía que envidiar a Jacques Hadamard, quien dejó olvidada a su hermana en el monte porque estaba enfrascado en la recolección de helechos.

todo el plano complejo a funciones meromorfas. Las funciones meromorfas son funciones holomorfas en un conjunto abierto del plano complejo, excepto en un conjunto discreto de puntos, que corresponden a polos: las funciones meromorfas tienden a infinito en cada uno de estos polos. Es frecuente expresar estas funciones en el entorno de sus polos mediante una serie, llamada serie de Laurent, que contiene a la vez términos elevados a potencias positivas y negativas: en torno a un polo z_0, una función f de una variable compleja se expresa, en efecto: $a_{-k}(z - z_0)^{-k} + ... + a_{-2}(z - z_0)^{-2} + a_{-1}(z - z_0)^{-1} + a_0 + a_1(z - z_0) + a_2(z - z_0)^2 + a_3(z - z_0)^3 + ...$ La serie tiende hacia infinito en el punto z_0 si el coeficiente a_{-k} es no nulo; en tal caso, el orden del polo

LAURENT SCHWARTZ es matemático. Recibió la medalla Fields en 1950.

es k. Su obra titulada *La série de Taylor et son prolongement analytique* se convertiría en la biblia de todos los interesados en esta materia.

Por otra parte, Hadamard es por entonces profesor en un liceo. Como no tiene la menor idea de la dificultad relativa de los diversos aspectos de las matemáticas, no consigue adaptarse al nivel de los alumnos. El director del Liceo Buffon tiene la intención de sancionarle, pero se sabe que Hadamard es un gran matemático, de modo que, ya doctor, el rectorado le confía una plaza de adjunto en la Universidad de Burdeos, donde permanecerá desde 1893 hasta 1897.

Funciones nuevas, resultados matemáticos nuevos. Hadamard, en Burdeos, se interesa por las funciones enteras, es decir, por las funciones cuyo desarrollo en serie es convergente en todo el plano complejo. Intrigado por el comportamiento de tales funciones en el infinito, se interesa por las relaciones entre tres cantidades: el decrecimiento en el infinito de los coeficientes del desarrollo en serie de Taylor de la función en torno al origen; el crecimiento del máximo del módulo de la función sobre círculos concéntricos con centro en el origen y radio que tiende a infinito (las funciones estudiadas asocian un número complejo $f(z)$ a cada número complejo z; si $f(z)$ se escribe en la forma $x + iy$, su módulo es igual a $\sqrt{(x^2 + y^2)}$; y, por último, la distribución de los ceros de la función en el plano complejo (los ceros son los puntos en los que la función se anula).

Los números primos

Este trabajo, que le reportó el Gran Premio de ciencias matemáticas, le llevó hacia la teoría de números, donde obtuvo un teorema que proporciona la distribución de los números primos. El matemático alemán Bernhard Riemann (1826-1866) había introducido una función, llamada función *zeta*, que a cada número complejo z le asocia la suma

$1/1^z + 1/2^z + 1/3^z + ...$ Mucho antes, el suizo Leonhard Euler (1707-1783) había observado que dicha suma es igual al producto de los términos de la forma $1/(1 - 1/p^z)$, donde p recorre el conjunto de los números primos. Euler tendía así un puente entre la geometría analítica y la teoría de números. Riemann, que volvió a atacar el problema, observó que todos los ceros de la función *zeta* que no fueran –2, –4, –6, –8 ... tenían, al parecer, parte real igual a 1/2 (*véase la figura 5*). Todavía más, de ser tal hipótesis (llamada ahora conjetura de Riemann) correcta, resultaría que el número de primos menores que un número n sería del orden de $n / \log(n)$, cuando n tiende a infinito.

Hadamard no estaba satisfecho con la conjetura de Riemann, que sigue sin demostrar en nuestros días (se ha verificado mediante ordenador que se cumple para varios millones de ceros de la función y el matemático Godfrey Hardy demostró que el conjunto de ceros de *zeta* cuya parte real es igual a 1/2 es un conjunto infinito; pero la conjetura sigue sin estar demostrada). Buscó por ello un medio de independizar el teorema de los números primos de la conjetura de Riemann y lo encontró fundando su estudio sobre resultados menos ambiciosos, pero demostrados, a saber, que la función *zeta* no se anula jamás para números complejos de la forma $1 + iy$, donde y es un número real cualquiera. Después, merced a este ingenioso recurso, demostró el teorema de la distribución de los números primos (teorema que también es demostrado por Charles-Jean de la Vallée-Poussin, en Lovaina).

Como es natural, este teorema proporciona sólo el lugar aproximado donde puede encontrarse el n-ésimo número primo; la posición exacta de los números primos sólo podría venir dada por una serie infinita. ¿Resultará posible hallar tal serie? Hadamard se convence de que haría falta disponer de una demostración de la hipótesis de Riemann. Prosigue su estudio y encuentra un teorema de simetría de la función *zeta*. Su trabajo vuelve a ser laureado por la Academia de Ciencias.

Reconocida así su notable capacidad, en 1897 es nombrado “maître de conférences” de la Sorbona. En este cargo, que ocupará hasta 1909, prosigue el estudio de las funciones de variable compleja y obtiene muy rápidamente el teorema hoy conocido por teorema del mínimo de Hadamard: cualquiera que sea la función f de una variable compleja z, existe una sucesión de círculos con centro en el origen, cuyo radio tiende a infinito, en los cuales el mínimo del módulo de la función es del mismo orden de magnitud que el inverso del máximo del módulo de la función.

Por ejemplo, en el caso de la función $f(z) = e^z$, el máximo del módulo sobre el círculo de radio r es e^r, mientras que el mínimo del módulo es e^{-r}; en este ejemplo, el mínimo del módulo es exactamente igual al inverso del máximo del módulo (e^{-r} es igual a $1/e^r$), y la relación es verdadera en todos los círculos, porque la función e^z no se anula jamás. Sin embargo, en el caso de otras funciones sólo subsiste el resultado que proporciona el teorema del mínimo.

A continuación, en 1898, tan sólo un año después de su nombramiento, Hadamard estudió las superficies de curvatura total negativa formadas por un número finito de hojas que se extienden hasta el infinito (un cilindro de eje vertical, por ejemplo, tiene dos hojas: un punto puede partir hacia el infinito dirigiéndose hacia arriba o hacia abajo; la curvatura total del cilindro en cada punto es nula).

En tal estudio examinó las curvas geodésicas, es decir, las curvas análogas a los círculos máximos de la esfera. Sobre estas superficies de curvatura total negativa (que en cada uno de sus puntos se parece a una silla de montar) las geodésicas son de tres tipos: son cerradas o asintóticamente próximas a curvas cerradas; o bien se extienden hasta el infinito manteniéndose sobre una de las hojas; o bien segmentos enteros de estas geodésicas se aproximan sucesivamente a una serie de geodésicas cerradas, y la longitud de estos segmentos crece hasta el infinito. Hadamard analizó las propiedades del conjunto de tangentes a las geodésicas.

Fue así como pasó a la topología. En realidad estaba trabajando sobre varios temas a la vez, puesto que en 1903 publicó sus *Leçons sur la propagation des ondes et les équations de l’hydrodinamique*. Y es que, tras sus contactos con el físico Pierre Duhem en la Universidad de Burdeos, Hadamard se interesó por la física.

Al respecto de la propagación de ondas y de la ecuación de ondas, puso de manifiesto los distintos comportamientos de las ondas en espacios de diferentes dimensiones, demostrando, en especial, una discrepancia importante entre los espacios de dimensión par y los de dimensión impar. En los espacios de dimensión impar, como el nuestro, el sonido que se emite desde un punto se propaga permaneciendo sobre la superficie de una esfera en expansión, cuyo radio crece con regularidad (la velocidad del sonido); por el contrario, en los espacios de dimensión par (un plano, por ejemplo)

Essai sur l'étude des fonctions données par leur développement de Taylor;

Par M. J. HADAMARD,

Ancien élève de l'École Normale supérieure.

INTRODUCTION.

Le développement de Taylor rend d'importants services aux mathématiciens, en raison de sa grande généralité. Lui seul, en effet, permet de représenter une fonction analytique quelconque, à certains cas singuliers près.

Depuis les travaux d'Abel et de Cauchy, on sait qu'à toute fonction régulière dans un certain cercle correspond un développement de Taylor, et réciproquement. C'est même ce développement que M. Weierstrass, et, en France, M. Méray emploient pour définir la fonction.

Un point a étant donné au hasard, on pourra, en général, former une série ordonnée suivant les puissances entières et positives de $x - a$ et qui représentera notre fonction dans le voisinage du point a. Il pourra y avoir exception pour certaines positions particulières du point a. C'est à ces points particuliers que l'on donne le nom de *points singuliers*.

On peut donc dire que se donner une fonction analytique non singulière au point $x = o$, c'est se donner une suite de coefficients a_1,

3. UNO DE LOS PRIMEROS RESULTADOS notables de Hadamard se refiere a las funciones dadas por series de Taylor, que son de la forma $a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + ...$

llena toda la bola, y no sólo la superficie esférica que la limita.

En consecuencia, la música (que Hadamard practicaba, pues tocaba el violín) sería diferente si nuestro universo tuviera un número par de dimensiones; de hecho, las ondas descritas por una ecuación que tuviera en cuenta los fenómenos de amortiguación y de perturbación llenarían siempre la bola, como en el caso de las dimensiones pares. Hadamard proporcionó además un teorema de descenso, que permite hallar las soluciones en dimensiones inferiores cuando se conoce una solución en una dimensión dada.

Siguiendo con esta categoría de problemas, desde 1904 a 1921 buscó soluciones completas del problema de Cauchy para ecuaciones en derivadas parciales de segundo orden: en términos físicos, este problema consiste, por ejemplo, en buscar la forma de una cuerda vibrante, en un instante cualquiera, cuando se la deja libre desde una forma predeterminada, moviéndose cada punto a una velocidad impuesta y permaneciendo fijos los extremos.

Hadamard expuso los resultados de sus investigaciones en la Sorbona, cuidando siempre de transmitir a sus estudiantes su noción de problema bien planteado: un problema está bien planteado si tiene una solución y si, además, la solución depende continuamente de los datos: una pequeña variación de los datos no debe comportar sino una pequeña variación de las soluciones.

Tanto le apasionaba esta cuestión de la estabilidad que reanudó el estudio de las geodésicas de las superficies, demostrando que si partimos de un punto con una pequeña variación de la dirección inicial, ello puede entrañar una considerable variación del trayecto final. Hadamard planteaba así el problema de la estabilidad a largo plazo del sistema solar.

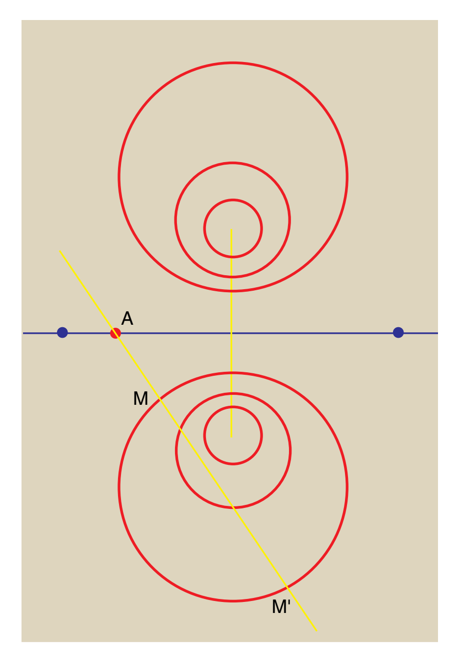
La Fundación Silliman de la Universidad de Yale publicó este trabajo en un libro de 600 páginas: *Le problème de Cauchy et les équations aux derivées partielles linéaires hyperboliques*. Publicación que resulta un tanto paradójica, porque los fondos facilitados por el Sr. Silliman a la Universidad de Yale habían de servir para “instituir anualmente una serie de lecciones destinadas a demostrar la previsión, la sabiduría y la bondad de Dios, tanto en sus manifestaciones en el mundo natural como en el moral. Es convicción del testador que toda presentación bien ordenada de los hechos de la naturaleza o de la historia contribuye al propósito de la fundación más eficazmente que ninguna otra tentativa de desarrollo sobre los principios de la doctrina o de la fe; y, en consecuencia, ha decidido excluir del propósito de la fundación las lecciones de teología dogmática o polémica, y dedicarlo más bien a materias tomadas de los dominios de las ciencias de la naturaleza o de la historia, muy especialmente de la astronomía, la química, la geología y la anatomía”.

Ahora bien, Hadamard, aunque originario de una familia judía alsaciana, era absolutamente ateo, y sus matemáticas no son ni ciencias de la naturaleza, ni historia, ni astronomía, ni tampoco, química, geología o anatomía. ¡Poco importa! Este texto les resulta útil a numerosos matemáticos; mi propia teoría de distribuciones le debe no poco: dediqué tres meses de vacaciones a estudiarlo.

La difusión internacional

Hadamard estaba en el pináculo de su gloria cuando en 1909 fue nombrado profesor del Collège de France. Allí enseñaría hasta 1937, simultaneándolo con la École polytechnique y la École centrale. En el Collège de France, el lema de sus seminarios de martes y viernes era: “Generalizar para simplificar o para comprender mejor.” A veces citaba también a Poincaré: “No hay problemas resueltos y problemas sin resolver: hay problemas más o menos resueltos.” Los más grandes matemáticos del mundo tuvieron a honra ir a presentarle sus trabajos o a comentar los de otros en sus seminarios. Paul Lévy ha señalado que, para los estudiantes avanzados, Hadamard era un profesor notable, porque enseñaba siempre matemáticas que él personalmente había estudiado y porque insistía en las ideas generales y en los errores que era importante evitar.

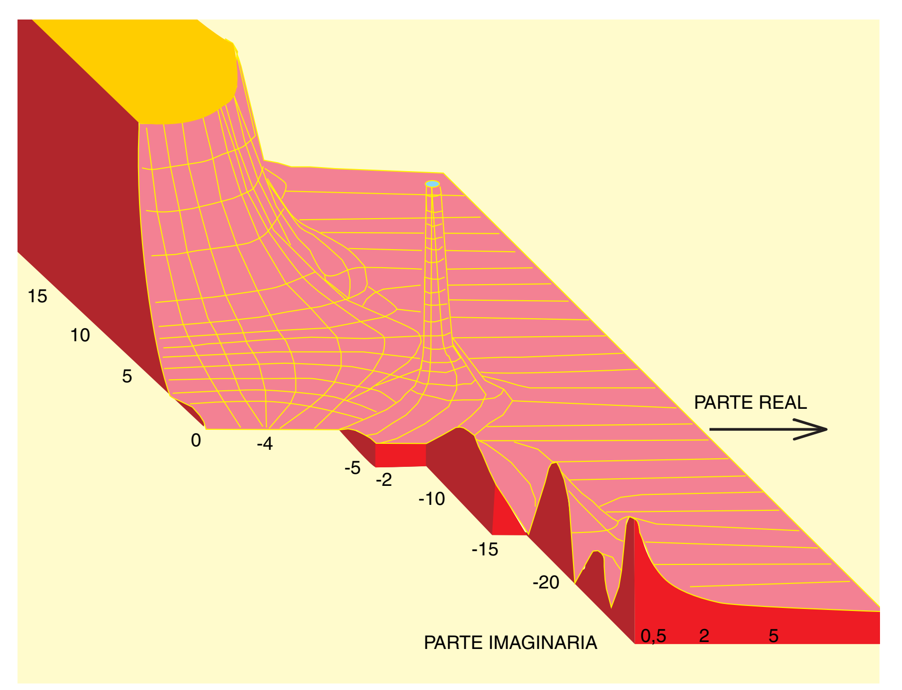
En contrapartida seguía siendo un guía lamentable para los jóvenes. En 1931, cuando fue elegido para la Academia de Ciencias, yo estaba en primer curso. Fui a verle exprofeso, con el propósito de que me aconsejase. Me habló entonces de la función *zeta* de Riemann, que yo no conocía, y de la distribución de los números primos. Yo no comprendía nada de lo que me estaba diciendo. “No me pareces muy competente”, me dijo. La entrevista, no obstante, continuó. Pasó enseguida al trinomio de segundo grado y yo le cité la fórmula de las raíces, que me sabía de memoria: “Veo que sabes mucho”, apostilló, lo que me demostró, por una parte, que sería muy difícil que yo pudiera aprender con él y, por otra, que no establecía la menor diferencia entre lo sencillo y lo complicado.



4. LOS SEIS CIRCULOS en rojo pertenecen al mismo haz, cuyo eje radical es la recta azul: cualquiera que sea el punto *A* de la recta, el producto *AM·AM’* es el mismo, independientemente de la recta, con tal de que pase por *A* y corte a los círculos del haz en dos puntos, *M* y *M’*. Hadamard utilizó tales haces de círculos para construir puntos imaginarios (*en azul en la figura*.)

En 1932 publicó un libro monumental, empezado en Burdeos: un tratado de geometría elemental en dos volúmenes, que fue mi libro de cabecera cuando yo estaba en último curso de Bachillerato. Esta obra contiene un número increíble de problemas, pero contiene también errores en la axiomática; por ejemplo, Hadamard, sin darse cuenta, demuestra que la dimensión del espacio es igual a tres.

Introduce puntos imaginarios del plano, sin referirse antes a los números imaginarios del conjunto de los números complejos, pues ambiciona crear una obra puramente geométrica. Considera pares de círculos: si dos círculos no se cortan (en dos puntos), define, entonces se cortan en dos puntos imaginarios conjugados; si cuatro círculos pertenecen a un mismo haz, entonces los pares de círculos definen los mismos pares de puntos imaginarios conjugados.



5. El MODULO de la función *zeta* de Riemann, definida en el plano complejo, está representado aquí por la cota de los puntos de la superficie en rosa. Según se cree, esta función solamente se anula para los números reales cuya parte real sea igual a 1/2.

El haz de círculos engendrados por dos círculos dados es el conjunto de círculos que tienen por eje radical, con uno cualquiera de los dos círculos, el eje radical de los dos círculos; este eje radical es la recta formada por el conjunto de puntos que tienen la misma potencia con respecto a los dos círculos, siendo la potencia de un punto *A* con respecto a un círculo el producto *AM*·*AM*', donde *M* y *M*' son las intersecciones de una recta que pasa por el punto *A* y corta al círculo en dos puntos.

Si Hadamard hubiera utilizado números, su tarea se habría simplificado. De igual manera que por adjunción del conjunto de los números imaginarios al conjunto los números reales (conjunto R) se obtiene el plano de los números complejos (el plano C de los números complejos es, por lo tanto, el conjunto de los números de la forma $R + iR$), Hadamard podría haber añadido al plano $R \times R$ los números $iR \times R$, formando así el conjunto $(R \times R) + i(R \times R)$. Mas no queriendo que ninguna coordenada, ninguna relación analítica, ninguna trigonometría viniera a “perturbar” este hermoso monumento geométrico, cedió al empecinamiento de la época y creó una obra monumental pero acrobática.

Por fin, se jubiló en 1937, a la edad de 72 años y con más de 300 textos matemáticos publicados en su haber. La edad normal de jubilación de los profesores del Collège de France eran 70 años, pero los dos hijos que perdió durante la Primera Guerra Mundial le valieron estos dos años suplementarios. Estalló entonces la Segunda Guerra Mundial y tuvo que abandonar Francia. Tenía previsto partir hacia los Estados Unidos, pasando a través de España, por lo que residió una temporada en Toulouse, lo mismo que mis padres.

Genio y figura...

Su carácter distraído no mejoró con los años. Un día fue con mi hermano Bertrand a comprar huevos a una tienda que no vendía más que media docena por familia. Aunque Hadamard y mis padres no pertenecían a la misma familia, había cierto riesgo de que el tendero se negase a dar media docena a Bertrand y otra media a Hadamard, de modo que mi tío-abuelo y mi hermano se pusieron de acuerdo para hacer como si no se conocieran. Sin embargo, de camino a la tienda, Hadamard tuteó a mi hermano sin cesar y, una vez dentro, siguió hablándole. Una vez servido, recordó de pronto las precauciones convenidas al salir de la tienda, diciéndole a mi hermano: “Hasta la vista, estimado señor; encantado de haberle conocido.” Y se marchó, mientras mi hermano se quedaba aterrorizado, temiendo que no le atendieran. Peor todavía, al cabo de pocos metros volvió sobre sus pasos y, olvidando otra vez lo convenido, le dijo a Bertrand: “Mira, tienes que decirle a tu madre que...”

Algún tiempo después y tras no pocas dificultades para lograr el visado para viajar a los Estados Unidos, salió de Francia y llegó a España tras un viaje complicado... para caer en la cuenta de que había olvidado el visado. ¡Vuelta a repetir las formalidades!

En los Estados Unidos no le fue fácil encontrar un puesto, pues eran muchos los sabios alemanes que ya se habían refugiado allí. En cierta universidad fue recibido por el presidente, que le explicó lo difícil que era proporcionarle una cátedra. Hadamard le indicó entonces una de las fotografías de la pared, en la que aparecía. ¿No constituía eso un título suficiente para poder enseñar? El presidente le pidió algún tiempo para reflexionar, pero, cuando Hadamard volvió, le dijo que no había ningún puesto disponible... y se dio cuenta de que su fotografía había desaparecido de la pared. Fueron momentos tristes.

Por fin fue acogido en Nueva York, donde esperó la terminación de la guerra para volver a Francia. En la última etapa de su vida siguió interesándose por la historia y por la epistemología, publicando no pocos artículos de heurística, de historia de las matemáticas y sobre la enseñanza. Creía en la intuición y comparaba las impresiones de Poincaré con sus propias experiencias. Su ensayo sobre este tema se imprimió en los Estados Unidos en 1945.

El “abuelito Hadamard”, como le llamaban los matemáticos con respeto y admiración (Sartre se equivoca cuando sostiene en *Les Mots* que sólo se les llama “abuelos” a las personas viejas y pobres), seguía despierto y activo, implicándose en numerosas causas políticas. Como era casi comunista (y sus hijos lo eran ardientemente), formó parte de una delegación de sabios franceses invitados a la Unión Soviética, en compañía de Élie Cartan y de Pierre Joliot-Curie. Durante una visita al Museo de la Revolución, en Moscú, manifestó su asombro al no ver mención alguna de Trotsky. Le respondieron que Trotsky era un traidor, que no merecía figurar en el museo. “Así será, pero desempeñó un papel en la revolución. ¿Es esto un museo de recompensas o un museo de la revolución?” Joliot-Curie le dijo que era ingenuo pensar que él fuese a reformar el régimen soviético, pero Hadamard le respondió que Trotsky

se encontraría en el museo si todo el mundo hubiera reaccionado. Hasta el final de sus días asistió regularmente a numerosos seminarios Bourbaki, el grupo de jóvenes matemáticos que al terminar la guerra quiso fundar las matemáticas sobre bases axiomáticas seguras. Hadamard hacía preguntas invariablemente al final de cada exposición, para verificar su interpretación de la terminología utilizada por los oradores: ¡era tanto lo que habían cambiado las matemáticas desde finales del siglo XIX!

También era frecuente que le invitasen al extranjero. En el transcurso de un épico viaje por China, prometió a sus anfitriones escribir para ellos un libro sobre las ecuaciones en derivadas parciales. Lo empezó a los 80 años de edad, pero diez años después sólo había llegado al octavo de los veintidós capítulos previstos; tan preocupado estaba que no podía dormir y su vida era un infierno. Su esposa me rogó que interviniese; la discusión duró varias horas, tras las cuales consintió en enviar el manuscrito tal cual estaba. Los ocho capítulos se enviaron a China en un paquete no certificado y mal envuelto; no se había hecho fotocopia. El envío tardó varios meses en llegar y el libro apareció después de su muerte.

Eliminada esta preocupación, pudo dedicarse a gozar con el éxito de sus discípulos. Lagrange había dicho: "Es grato ver crecer en el jardín de otro las plantas cuya simiente uno ha sembrado." Hadamard añadía: "Nada puede ser más valioso para el sabio que sentirse superado en los mismos caminos que él comenzó a trazar."

En 1962 perdió a su esposa y a su nieto; para entonces, su hija Cécile había fallecido ya. Estando yo en Nueva York, me escribió diciendo que estaba triste y que había perdido las ganas de vivir. Falleció poco después, en 1963, a la edad de 98 años y medio, dejando una obra inmensa que trataba de materias notablemente distintas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

INVENTEURS ET SCIENTIFIQUES, DICTIONNAIRE DE BIOGRAPHIES, Ediciones Larousse, 1994.

DICTIONARY OF SCIENTIFIC BIOGRAPHIES, Ediciones Scribners

DICTIONNAIRE DES MATHÉMATIQUES, Alain Bouvier y Michel George; dirección de François Le Lionnais. Presses Universitaires de France, 1979.

Matematización del parecido

La inteligencia consiste en reconocer los parecidos, pero ¿en que consiste el parecido?

Jean-Paul Delahaye

Que la cabeza del rey francés Luis Felipe hacía pensar en una pera es algo que salta a la vista en las caricaturas. Y resulta evidente que el mapa de Italia parece una bota. Que el sonido del bombo recuerda al trueno es cosa que los compositores conocen y utilizan. Que el argumento de "La bicicleta azul" se parezca al de "Lo que el viento se llevó", en cambio, es cuestión que se remite a la evaluación de los jueces. El reconocimiento de parecidos reviste importancia crucial para la supervivencia: sin una noción instintiva de "situación equivalente", sin un dominio de los "rostros parecidos", de los "animales de la misma especie", seríamos incapaces de orientarnos, de reconocernos, de identificar los alimentos o las fieras peligrosas.

La dificultad estriba en que nunca pasa dos veces la misma agua bajo el puente: dos situaciones no son jamás idénticas en todos sus aspectos; jamás hay dos animales que sean exactamente iguales, nunca el rostro de nuestros conocidos presenta idéntico aspecto en momentos distintos, etc.

Y, empero, somos capaces de juzgar que dos situaciones, dos objetos, dos imágenes son análogas y tal capacidad es uno de los componentes esenciales de la inteligencia. Uno de los grandes problemas de la inteligencia artificial consiste en la preparación de programas que, al menos en parte, sean capaces de reconocer objetos que se parezcan. El problema es difícil (y todo progreso en inteligencia artificial lo es), pero ¿habrá por eso que renunciar a resolverlo y pensar que se encuentra definitivamente fuera de nuestro alcance? Las matemáticas, que aspiran a proporcionar instrumentos para la comprensión del mundo, para elaborar modelos de él, para dominarlo, ¿ofrecen teorías apropiadas para el parecido?

Para ver que así es examinaremos algunas de tales teorías. La última de ellas ha sido creada hace poco por un grupo de físicos, matemáticos e informáticos. Se trata de una teoría fascinante en virtud de los lazos que establece con la termodinámica y porque cabe considerarla como la teoría última de la semejanza.

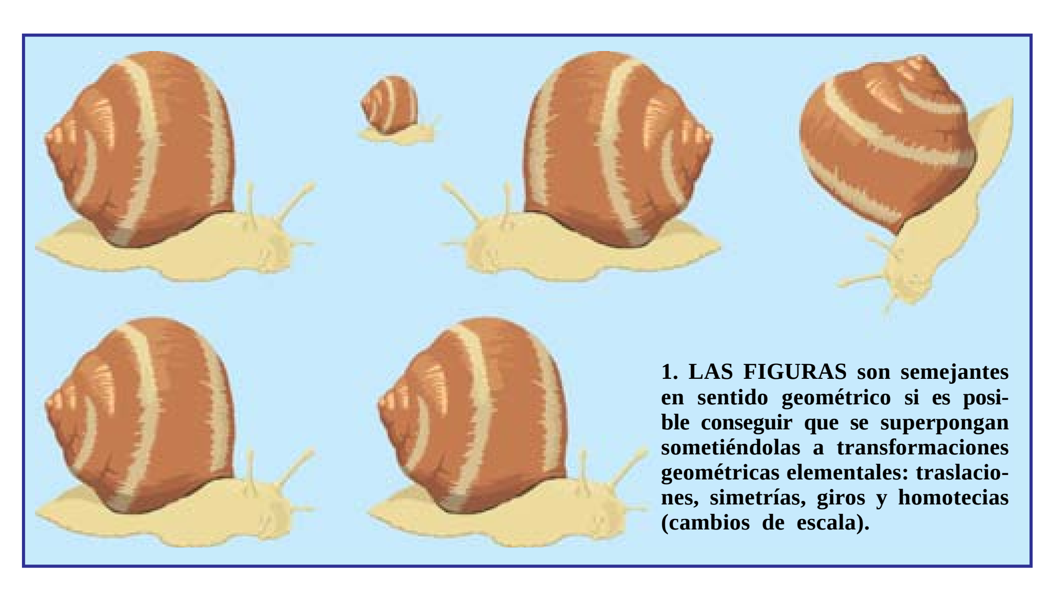
Las semejanzas geométrica y topológica

La idea matemática más antigua es la de semejanza geométrica: dos figuras lo son si mediante una sucesión de traslaciones, giros, simetrías y homotecias (ampliaciones y reducciones que respeten las proporciones) resulta posible llegar a superponerlas.

Esta noción de semejanza geométrica resulta útil para dibujar los planos de edificios o de automóviles, pero es demasiado limitada, por demasiado rígida. No es el tipo de semejanza capaz de indicarnos si dos fotografías diferentes representan el mismo rostro. Los matemáticos, conscientes de esta limitación, han propuesto una noción de semejanza mucho más flexible: la homeomorfía.

Dos superficies son homeomorfas si al imaginarlas fabricadas con una goma perfecta es posible deformar una de ellas, sin romperla ni rasgarla, hasta convertirla en la otra. La noción de parecido es ahora demasiado laxa. La superficie de un cubo es topológicamente semejante a la de un globo e incluso a la de un tenedor. La *semejanza topológica* ocasiona, por otra parte, situaciones paradójicas: un sistema de anillos entrelazados puede ser progresivamente transformado en el mismo sistema de anillos sueltos. Muchas otras nociones de la topología generalizan y amplían la noción de homeomorfismo, pero ninguna de ellas logra asir sino una parte bien magra de la idea de analogía.

Una de las razones la constituye, sin duda, que para hablar de figuras semejantes hay que renunciar a respuestas simplistas, del tipo "sí" o "no": es necesario idear una *medida del parecido*. Esta evaluación



1. LAS FIGURAS son semejantes en sentido geométrico si es posible conseguir que se superpongan sometiéndolas a transformaciones geométricas elementales: traslaciones, simetrías, giros y homotecias (cambios de escala).

numérica vendrá dada por lo que se denomina una “distancia”: dos objetos idénticos se encontrarán a distancia nula; dos objetos muy parecidos, a pequeña distancia uno del otro; la distancia entre objetos muy diferentes será grande.

La distancia de Hausdorff

Una primera noción de distancia que resulta satisfactoria en no pocos casos es la distancia de Hausdorff, así llamada en honor de Felix Hausdorff, matemático alemán fallecido en 1942. Hausdorff enunció, en 1914, los axiomas generales de la topología.

La distancia o “métrica” de Hausdorff mide la separación entre objetos dibujados en blanco y negro sobre una hoja de papel (son posibles las generalizaciones a espacios de tres o más dimensiones, o que tengan en cuenta los colores). Para definir esta métrica se parte de la noción habitual de distancia entre dos puntos.

Por definición, dos objetos *A* y *B* dibujados en una hoja de papel (es decir, dos conjuntos de puntos *A* y *B*) se encuentran uno de otro a distancia de Hausdorff menor que *r* unidades si cada punto de *A* se encuentra a menos de *r* unidades de al menos uno de los puntos de *B* y si, recíprocamente, cada punto de *B* se encuentra a distancia menor que *r* de por lo menos uno de los puntos de *A*.

Hay un procedimiento sencillo que permite ver en qué consiste la distancia de Hausdorff entre dos conjuntos *A* y *B*: se sustituye cada punto del conjunto *A* por un “lunar”, cuyo radio *r* se hace crecer hasta que *B* quede recubierto por este “*A* hinchado”. Imaginamos asimismo el proceso recíproco (el recubrimiento de *A* por un “*B* hinchado”). La distancia de Hausdorff entre *A* y *B* es el radio mínimo que permite lograr simultáneamente ambos recubrimientos.

Esta distancia logra asir correctamente no pocos aspectos de la idea intuitiva de semejanza. Se considerará que dos dibujos que solamente se diferencien en el grosor de los trazos, o por el hecho de que uno de ellos haya sido dibujado con línea de puntos se hallan muy próximos uno del otro: basta hinchar un poco a cada uno de ellos para recubrir al otro.

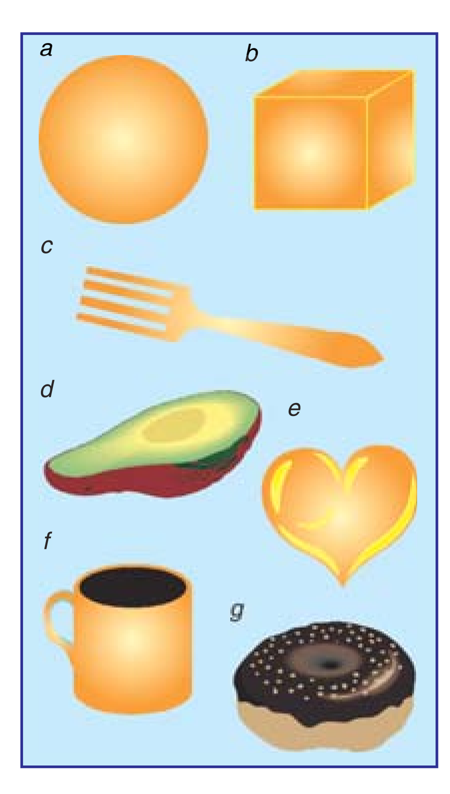
De igual modo, la versión difusa de un dibujo *A* visto a través de un cristal esmerilado se encontrará a poca distancia del dibujo *A*; más todavía, si en un dibujo reemplazamos las zonas negras por regiones finamente rayadas o rellenas de puntos aleatorios, también será pequeña la distancia entre la figura inicial y su transformada.

Un disco y una elipse de pequeña excentricidad de radios comparables se encontrarán cercanos según la distancia de Hausdorff; un cuadrado y un círculo, por el contrario, se encontrarán más alejados. En general, al modificar la textura o desplazar ligeramente los puntos de un dibujo, preservando su aspecto general, se obtiene un dibujo próximo según la distancia de Hausdorff; los cambios de forma originan dibujos alejados.

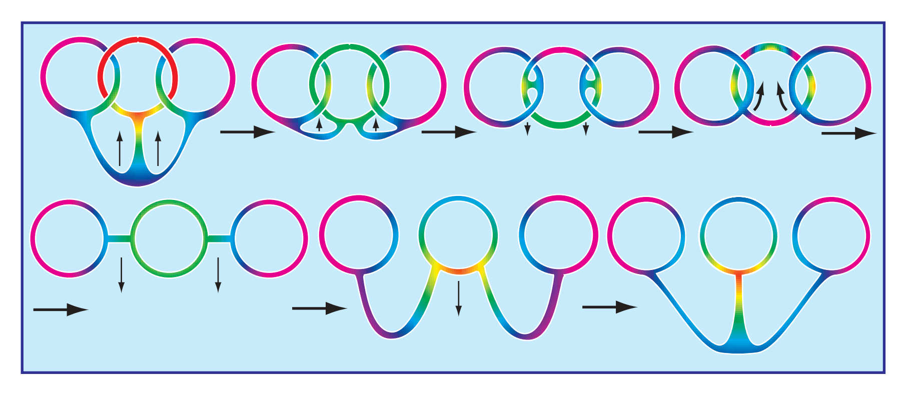
Tenemos un caso interesante en la aproximación finita de conjuntos infinitos. Un dibujo que suponga un número infinito de puntos —por ejemplo, un círculo lleno— puede ser aproximado cada vez con mayor precisión mediante una serie de figuras que consten cada una de un número finito de puntos. En este caso, lo infinito, incluso si no es enumerable, se deja aproximar fácilmente por lo finito.

Esta distancia también se utiliza implícitamente por cualquiera que dibuje fractales: nadie ha dibujado jamás una figura fractal auténtica, pues ésta, por definición, está infinitamente recortada, hecho que ninguna pantalla, ninguna impresora, ningún lápiz, logrará jamás reproducir con plenitud (observemos igualmente que tampoco nadie dibuja rectas o círculos auténticos). En contrapartida, las representaciones que damos a las fractales son en realidad objetos próximos en el sentido de la distancia de Hausdorff: lo mismo que se habla en prosa sin saberlo, nosotros nos valemos de la noción de semejanza en el sentido de Hausdorff aun sin haber oído jamás hablar de ella.

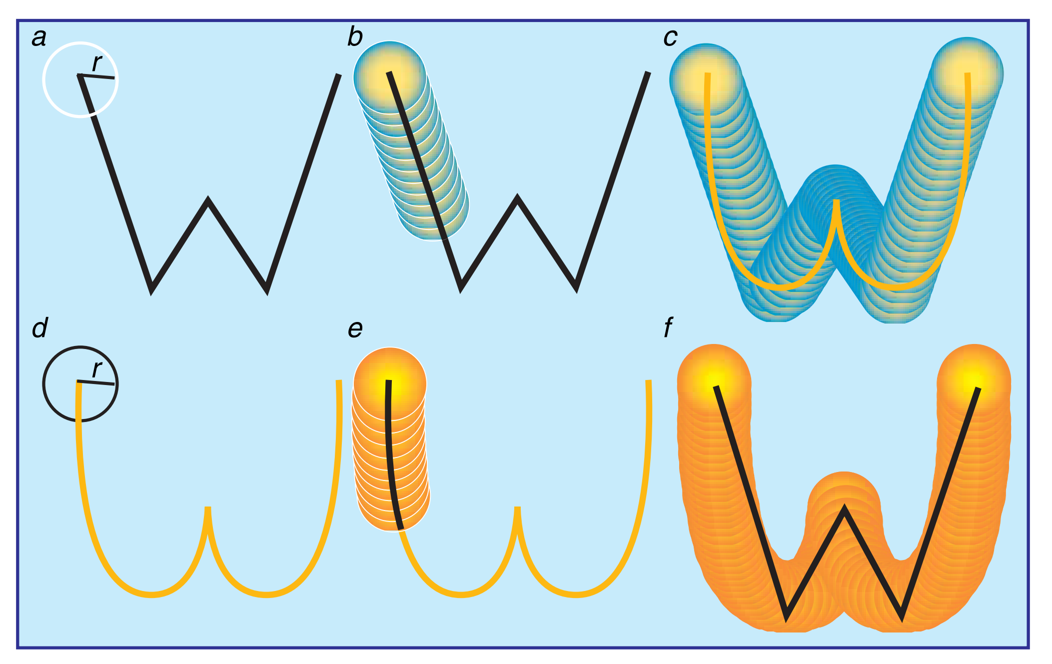
Dado que dos dibujos cercanos en sentido intuitivo resultan estar próximos en distancia de Hausdorff, se comprende la razón de que esta distancia constituya una herramienta esencial de la morfología matemática, disciplina cuyo propósito es la com-



2. LA SUPERFICIE DE UNA PELOTA puede ser deformada de manera continua hasta darle la forma de cubo, de medio aguacate, de corazón e incluso la de un tenedor. Dichos objetos son topológicamente equivalentes, pero resulta inaceptable considerarlos “parecidos”. La taza y la rosquilla son topológicamente equivalentes, pero no lo son a la esfera.



3. SOMETIENDO A TRANSFORMACIONES CONTINUAS superficies ilimitadamente elásticas, resulta posible pasar de una figura entrelazada a otra desenlazada, que no tiene relación “aparente” con ella. La semejanza topológica parece ser demasiado tolerante.



4. LA DISTANCIA DE HAUSDORFF es el mínimo radio, *r*, tal que, al reemplazar cada punto de *A* por un disco de radio *r*, la colección de discos recubre a *B*, y recíprocamente. Es una auténtica distancia: en el caso de que *A*, *B*, *C* sean conjuntos cerrados distintos del vacío, $d(A, A) = 0$; $d(A, B) = d(B, A)$; $d(A, C) \leq d(A, B) + d(B, C)$. (Se dice que el conjunto *X* es cerrado si el límite de toda sucesión de puntos de *X* que sea convergente también pertenece a *X*.)

prensión y el análisis de imágenes y de formas, y entre cuyas aplicaciones se cuentan la visión artificial, el tratamiento informatizado de imágenes, la biología y la geología.

Deficiencias de la métrica de Hausdorff

A pesar de lo dicho, la distancia de Hausdorff no reconoce la proximidad entre formas que la inteligencia humana considera instintivamente idénticas. Así, la distancia de Hausdorff entre un dibujo y su versión en negativo (o con una variante en la que sólo se conserven los contornos de las formas) es grande, mientras que nosotros, obviamente, nos damos cuenta enseguida de que representan el mismo objeto. Peor todavía: al añadir un solo punto en el exterior de un dibujo se obtiene un dibujo muy alejado según la distancia de Hausdorff, mientras que a nosotros ambos objetos nos parecen casi idénticos. De igual manera, la distancia entre un objeto y su ampliación por un factor constante es grande; nosotros, en cambio, reconocemos casi instantáneamente su estructura común.

Abundando en lo mismo: la distancia de Hausdorff no permite reconocer la semejanza entre imágenes de un objeto tridimensional (un rostro, por ejemplo) visto desde diversos ángulos y bajo diferentes iluminaciones, mientras que nuestro cerebro se percata muy rápidamente de la semejanza de sus formas.

Otra deficiencia de la métrica de Hausdorff, de menor importancia, pero que también es necesario señalar, es que no da buenos resultados con objetos de tamaño infinito. Dos rectas que pasan por un punto, o bien se confunden, en cuyo caso distan 0 (lo que es satisfactorio) o bien distan $+\infty$, incluso aunque formen un ángulo muy pequeño (lo cual no es aceptable).

Tampoco quedan bien medidas las deformaciones “plásticas”: los relojes blandos de Dalí no están próximos a los relojes auténticos en la métrica de Hausdorff, mientras que para nosotros sí lo están.

Señalemos que una combinación de la noción de distancia de Hausdorff con la noción de semejanza geométrica logra remediar algunas de estas limitaciones: para determinar la distancia entre *A* y *B* con esta métrica (denominada “Hausdorff-bis”), se consideran todas las figuras obtenidas por aplicación a *B* de semejanzas geométricas y se examina aquella que, en el sentido de la métrica de Hausdorff, se encuentre más próxima de *A*; ésta es entonces la que determina la distancia entre *A* y *B* para la métrica Hausdorff-bis. Esta variante corrige los defectos correspondientes a las deformaciones de escala y a los desplazamientos, pero no modifica en lo más mínimo las insuficiencias de la distancia de Hausdorff relativas al paso al negativo, la adjunción de un punto exterior o las deformaciones plásticas.

Hay una última noción de parecido que constituye un avance importante en el plano teórico y que abre las puertas a ciertas aplicaciones prácticas. Esta noción, a la que denominaremos distancia informática, es el resultado del trabajo común de cinco investigadores procedentes de diferentes disciplinas: los físicos Wojciech Zurek, del Instituto Santa Fe, y Charles Bennett, del Centro de Investigaciones de IBM en Nueva York; el matemático Peter Gacs, de la Universidad de Boston, y los informáticos Ming Li, de la Universidad de Waterloo, en Canadá, y Paul Vitanyi, de la Universidad de Amsterdam.

La distancia informática

La distancia informática presupone que todos los objetos que se consideran son conjuntos finitos de puntos tomados como un conjunto discreto. Es preciso imaginar que se trata de píxeles (negros o blancos) de una imagen. En el caso de la distancia de Hausdorff tal hipótesis de finitud no era necesaria, pero a veces resulta obligado renunciar al infinito para afinar un concepto, lo que tal vez no sea asombroso, pues, según ciertos filósofos de la matemática, el infinito no es más que una ilusión. Aunque posibles, no examinaremos aquí las generalizaciones de la distancia informática para el caso de más de dos dimensiones o las necesarias para tener en cuenta los colores.

Jean-Paul DELAHAYE es director adjunto del Laboratorio de Informática Fundamental del CNRS en Lille. [e-mail: delahaye@lifl.fr]

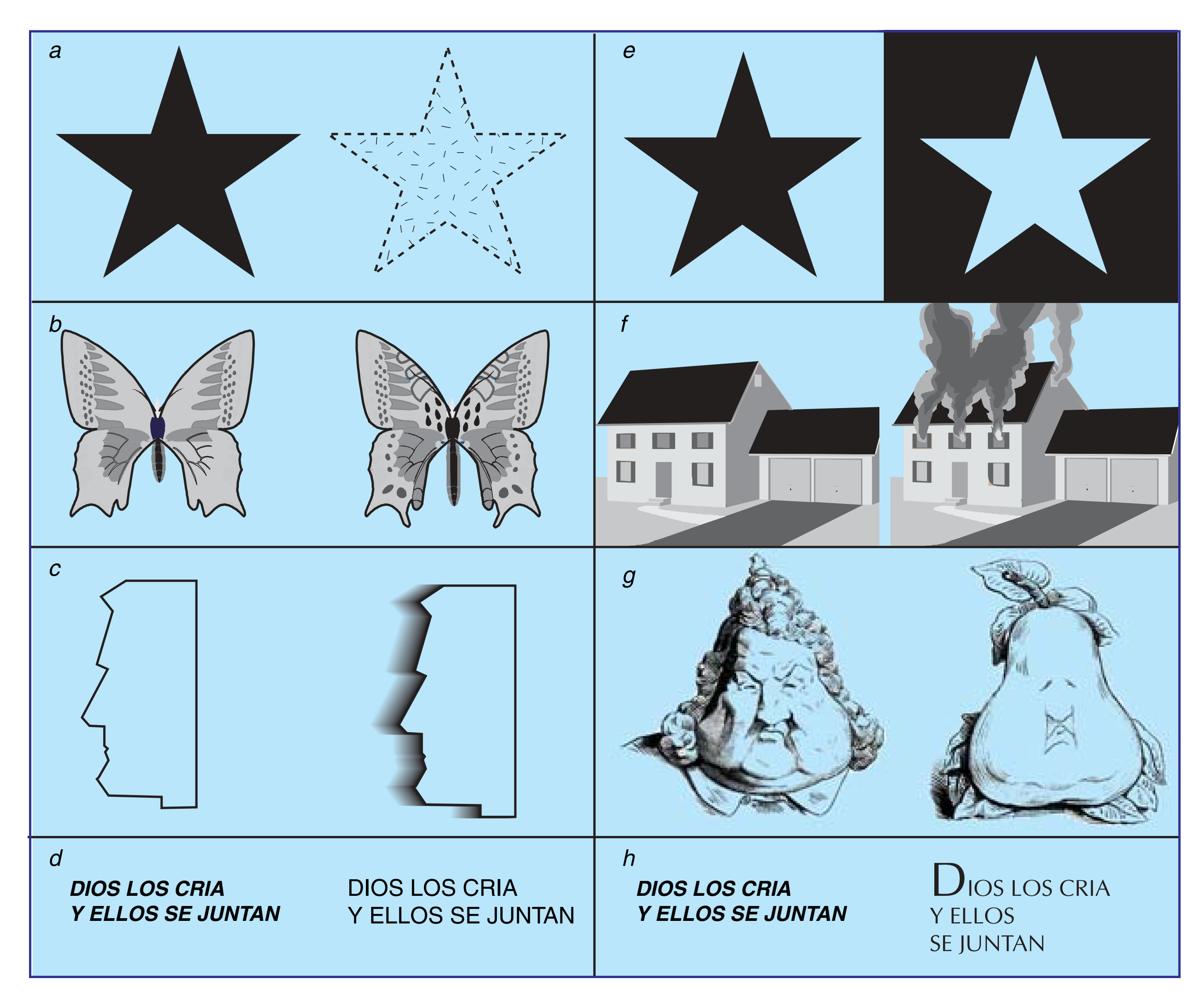
La idea fundamental es que, si dos objetos son parecidos, se pasa fácilmente de la descripción de uno a la descripción del otro, y recíprocamente. Por el contrario, cuanto más largo de especificar sea el paso de uno a otro, tanto más diferentes deben ser considerados los objetos o, si se quiere, tanto más alejados.

La dificultad del paso de una descripción del objeto *A* a la descripción del objeto *B* está medida por la longitud del programa mínimo que transforma la lista de puntos de *A* (que suponemos dados por enumeración) a la lista de puntos de *B*. Puede demostrarse que esta distancia depende poco del lenguaje de programación utilizado para escribir los programas.

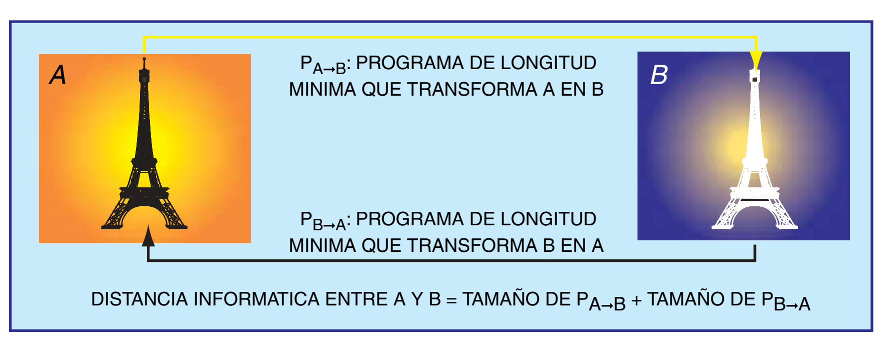
La idea de utilizar una noción de programa mínimo proviene de la teoría algorítmica de la información (también denominada teoría de la complejidad de Kolmogorov), en la cual la complejidad de un objeto *A* se mide por el tamaño del programa mínimo que produce *A*. La teoría de la distancia informática se vale, además, de numerosos resultados tomados de la teoría algorítmica de la información.

Para ilustrar la noción de distancia informática fijémonos en el dibujo de la Torre Eiffel y en su versión negativa (ya hemos dicho que estos dos objetos se encuentran a una distancia de Hausdorff grande). ¿Se hallarán cercanos según la distancia informática?

Sí, en efecto, porque es muy fácil escribir un programa de "paso a negativo" y este programa es breve; el programa más corto que transforme el primer dibujo en el segundo



5. LA SEMEJANZA entre cada par de figuras parece obvia. La distancia de Hausdorff logra captar algunas de estas semejanzas (las de la mitad izquierda, (*a*), (*b*), (*c*), (*d*)). Se le escapan, en cambio, las de la mitad derecha (*e*), (*f*), (*g*), (*h*). La distancia de Hausdorff constituye un medio eficaz, pero no infalible, para la detección de semejanzas. Los casos en que la distancia de Hausdorff resulta inútil para detectar la semejanza quedan correctamente tratados por la distancia informática. El programa para la transformación de un dibujo en su negativo (*e*) es muy breve, y ambos dibujos se encuentran, pues, próximos según la distancia informática. El programa para añadir un poco de humo y el necesario para eliminarlo (*f*) son ambos cortos, por lo que también estos dos dibujos se encuentran próximos informáticamente. Un programa permite pasar de un dibujo a otro (*g*) y ambos se encuentran relativamente próximos (en todo caso, más próximos que dos dibujos arbitrarios). Bastan unas pocas instrucciones de formato para transformar cada uno de los textos impresos en el otro, que consecuentemente se encuentran próximos según la distancia informática (*h*).



6. LA DISTANCIA INFORMATICA entre dos objetos *A* y *B* se obtiene sumando los tamaños de los programas mínimos que permiten pasar de *A* a *B* y de *B* a *A*. Esta distancia posee propiedades de carácter mínimo que le otorgan especial importancia en teoría algorítmica de la información. Además, sus relaciones con la termodinámica del cálculo le confieren una significación física que otras distancias no poseen.

(que es, en este caso, el mismo que transforma el segundo en el primero) será más breve todavía (señalemos que no es imprescindible conocer el programa más corto de todos) y, por consiguiente, ambos dibujos se encontrarán cercanos en el sentido de la distancia informática.

La adjunción de un punto al objeto *A* proporciona un objeto *B* que nuestro cerebro considera próximo. De acuerdo con tal percepción (y al contrario que la distancia de Hausdorff, que volvía a equivocarse en casos así), la distancia informática encuentra que *A* y *B* se hallan muy próximos, porque el programa más corto que añade un punto y el programa más corto que elimina un punto (para pasar de *B* a *A*) son ambos pequeños.

Todavía más notable e interesante es el caso de que examinemos la imagen de la Torre Eiffel desde otro ángulo. También podremos pasar ahora de una imagen a la otra, merced a un programa bastante corto (que habrá de contener información concerniente a la posición tridimensional de la torre). El parentesco entre dos imágenes de un mismo objeto tomadas desde distintos ángulos, o iluminadas de distinta forma, es detectado correctamente por la distancia informática.

Si tomamos dos textos, aunque sean muy largos, y el segundo es resultado de una recomposición y repaginación del primero (cambios en las fuentes tipográficas, sangrados, saltos de línea,...) la distancia informática entre ambos será pequeña, porque el paso de uno a otro admite una descripción concisa y, en consecuencia, un programa breve.

Otros muchos ejemplos demuestran que esta medición de la distancia, fundada en el tamaño de los programas, cumple en lo esencial nuestros deseos y que la mayoría de las deficiencias de la métrica de Hausdorff desaparecen con la distancia informática. La utilización práctica de esta distancia parece, empero, plantear graves problemas.

¿Resulta fácil la medición de la distancia informática entre objetos? Desdichadamente, no. No es demasiado difícil obtener cotas superiores para la distancia informática entre objetos: cada vez que encontramos programas que transformen *A* en *B* y *B* en *A* deducimos una de estas cotas superiores. Por el contrario, sólo en casos excepcionales podremos encontrar programas que sean demostrablemente mínimos; por consiguiente, la medición exacta de la distancia informática es muy rara.

La distancia informática y la indecidibilidad

Este problema práctico está ligado al de la indecidibilidad lógica, cuyo primer ejemplo fue el problema sobre la detención de un programa, propuesto por Turing en 1936. El resultado de Turing nos dice que jamás se podrá lograr un programa capaz de determinar, para cualquier programa que le sea presentado, si éste llegará a detenerse al cabo de un tiempo finito. En lo que concierne a la distancia informática, el resultado de indecidibilidad nos dice que jamás podremos concebir un programa capaz de calcular, indefectiblemente y siempre que sea necesario, la distancia informática entre dos objetos. Es posible que ciertos programas puedan tratar determinados casos, pero ninguno será capaz de tratarlos todos y, por lo tanto, ningún mecanismo general de razonamiento o de cálculo podrá servir de instrumento universal de medida de la distancia informática.

Esta imposibilidad práctica es reflejo, sin duda, del análisis inteligente necesario para formular juicios sobre el parecido: algunos nos resultan inmediatos; otros no se perciben sino tras largos análisis; otros, por último, sólo son apreciados por personas de rara sensibilidad. Mal puede causar sorpresa que la determinación del grado de analogía entre objetos cualesquiera resulte difícil de mecanizar y que no pueda, en definitiva, hacerse de manera completa.

La inteligencia es la cristalización en nuestros genes, primero, y en nuestro cerebro, después, de cómputos muy largos llevados a cabo por la evolución y por el desarrollo de las culturas humanas. La evolución biológica y el desarrollo cultural constituyen, en efecto, secuencias muy largas de acontecimientos similares a operaciones elementales de cálculo, cuyos productos son el habla, las ciencias y, con mayor generalidad, nuestra capacidad de análisis. Estos cálculos tan largos han producido en nuestras mentes, sin que sepamos exactamente cómo, una noción de analogía muy sensible y muy eficaz, esencial para nuestra supervivencia. Tal cristalización es incompleta (pues no existen razones serias para creer que nuestra inteligencia esté libre de las limitaciones impuestas por la lógica), pero muy superior a la que conseguimos introducir en nuestros programas: no sabemos, hoy por hoy, escribir programas que igualen nuestra capacidad para la percepción de analogías.

La distancia entre secuencias genéticas

La indecidibilidad ¿tornará estéril la noción de distancia informática? Felizmente esto no es así, porque las cotas superiores que sí podemos hallar la hacen utilizable en un buen número de casos.

Un ejemplo de aplicación de la distancia informática es la distancia definida por el equipo de bioinformática de Lille (compuesto por Max Duachet, Éric Rivals, Jean-Stéphane Varré y el autor) con el propósito de evaluar la distancia entre secuencias genéticas. Hace mucho que en genética (y, en particular, en la reconstrucción de árboles filogenéticos, árboles que indican los parentescos entre especies, animales o vegetales)

se utilizan medidas de la semejanza entre secuencias genéticas. La idea en que se fundan las distancias utilizadas hasta el presente es el recuento de las mutaciones, eliminaciones o inserciones de nucleótidos (las letras del alfabeto genético): cuanto mayor sea el número de cambios puntuales necesarios para pasar de una secuencia a otra, tanto más alejadas se consideran las secuencias. Recientemente hemos propuesto una nueva distancia que mide el alejamiento entre secuencias y que toma en consideración otros posibles sucesos, como el desplazamiento de segmentos de secuencia o su duplicación. Esta distancia, que hemos concebido como una aproximación calculable de la distancia informática, es más precisa que las distancias tradicionalmente utilizadas (a las que generaliza). Es de esperar, pues, que proporcione árboles filogenéticos más exactos.

Señalemos además que los modernos algoritmos de compresión de datos para las imágenes de las películas se inspiran en las ideas de que dos imágenes sucesivas, *A* y *B*, de una secuencia se encuentran próximas y de que, para ahorrar espacio, será suficiente codificar su diferencia, esto es, lo que hay que cambiar en *A* para obtener *B*. La cantidad de información que permite pasar desde *A* hasta *B* constituye, de hecho, la distancia informática entre *A* y *B* (o casi, pues prescindimos del paso de *B* a *A*.)

Interpretación termodinámica

La interpretación termodinámica de la distancia informática constituye una nueva confirmación de su interés. Los cinco investigadores mencionados han demostrado, en efecto, un notable resultado concerniente a la distancia informática: está relacionada con los costes termodinámicos mínimos de la transformación de *A* en *B* y de *B* en *A*.

Es sabido desde hace años, merced a los trabajos de Rolf Landauer y de Charles Bennett, que es teóricamente posible efectuar cómputos sin consumo de energía, los cuales, por consiguiente, no entrañan incremento alguno de la entropía física. Los únicos dispendios de energía ineludibles en un cálculo emanan de operaciones irreversibles, como sería el borrado de una memoria, gastos que podemos evitar si aceptamos que se conserven informaciones inútiles al concluir el cálculo.

Resulta interesante en tal caso considerar el flujo mínimo de información (aportación inicial de información a la situación *A*, eliminación de informaciones una vez concluido el cálculo y obtenido *B*) para transformar *A* en *B* de forma reversible. Esta distancia, deducida de consideraciones termodinámicas, es equivalente a la distancia informática; se diferencia de ella, a lo sumo, en un factor de 2. Otras propiedades de minimalidad confieren a la distancia informática un rango privilegiado entre todas las distancias imaginables.

La distancia informática entre *A* y *B* es, por tanto, una magnitud que tiene sentido en termodinámica, cualidad que ninguna otra distancia ni noción matemática de semejanza poseía hasta ahora. La concordancia entre la intuición y lo que la nueva distancia proporciona, su conexión con el mundo físico, amén de otras características descubiertas por el grupo de investigadores encabezados por Charles Bennet, muestran de forma palmaria que se ha identificado una noción profunda.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ESPACES TOPOLOGIQUES ET FONCTIONS MULTIVOQUES, C. Berge (véase el capítulo 6). Éditions Dunod, París, 1966.

IMAGE ANALYSIS AND MATHEMATICAL MORPHOLOGY. J. Serra. Academic Press, Nueva York, 1982.

THERMODYNAMICS OF COMPUTATION AND INFORMATION DISTANCE. C. Bennett, *et al.* en *Proc. 25th. Symp. Theory of Computation*, págs. 21-30, 1993.

INFORMATION, COMPLEXITÉ ET HASARD. J.-P. Delahaye. Éditions Hermès, París, 1994.

PHYLOGÉNIE ET COMPRESSION DE DONNÉES. J. S. Varré. Publicación del Laboratorio de Informática Fundamental de Lille, URA CNRS 369, julio de 1996.

AN INTRODUCTION TO KOLMOGOROV COMPLEXITY AND ITS APPLICATIONS. M. Li y P. M. B. Vitanyi (véase el capítulo 8). Springer-Verlag, 1997.

LES DISTANCES TRANSFORMATIONNELLES ET APPLICATIONS À LA PHYLOGÉNIE. J. S. Varré, E. Rivals, M. Dauchet y J.-P. Delahaye. Jornadas *Analyse des séquences génomiques*, École Polytechnique (Palaiseau), 20 y 21 de junio de 1996.

Artículos de P. Vitany en Internet: http://www.cwi.nl/~paulv/publications.html

TALLER Y LABORATORIO

Shawn Carlson

Cuando levanta la niebla

La niebla es un indicador decisivo de la salud de nuestra atmósfera. La niebla es casi siempre natural; la crean el vapor de agua, el polvo arrastrado por el viento, los incendios forestales y las erupciones volcánicas. Por desgracia no pocas de las consecuencias de las actividades humanas van a dar también en la atmósfera; el *smog* es el caso más conocido de niebla no natural. Aunque muchas ciudades cuidan y vigilan la transparencia de sus aires locales, sorprende lo poco que se conoce sobre cómo varía globalmente la intensidad de la niebla pues no hay nadie que coordine las observaciones sobre ello a través de zonas suficientemente amplias.

La situación podría variar gracias al último diseño de Forrest M. Mims III. (Puede que el nombre les resulte familiar, pues se ocupó de esta sección en 1990.) Su invento es un sensor de nieblas atmosféricas que no cuesta más que unos miles de pesetas y es tan fácil de construir que hasta el tecnófobo más recalcitrante podría montarlo en menos de una hora. Se trata de un instrumento que podría revolucionar esta importante área de estudios abriendo el terreno a todos los recién llegados, o sea, a los científicos aficionados.

El sensor de nieblas visibles se apoya en el hecho de que el Sol es la mejor de las sondas para medir una niebla. La intensidad de la luz solar que incide en la capa superior de la atmósfera es esencialmente constante. En consecuencia, si medimos la intensidad de la luz solar a nivel del suelo y si sabemos el espesor de la atmósfera que esa luz ha atravesado, podremos determinar la cantidad de luz que ha sido dispersada o absorbida y, por tanto, cuánta niebla hay.

Surge una complicación. Las moléculas de aire dispersan la luz según un fenómeno conocido como dispersión de Rayleigh, la cual, aunque produce unos cielos hermosamente azules y unas puestas de sol maravillosas, también dificulta la medición de las nieblas. Como la eficacia con que las moléculas de aire dispersan la luz depende de la longitud de onda, los especialistas limitan sus mediciones a una estrecha banda del espectro solar, para que puedan corregirse fácilmente los efectos de la dispersión de Rayleigh.

La mayoría de los instrumentos profesionales para medir nieblas emplean un fotodetector de espectro amplio, combinado con un filtro de banda estrecha, que proporciona la selectividad necesaria y es bastante caro. Mims se dio cuenta de que un detector de banda estrecha podría hacer el mismo papel. El dispositivo perfecto para un aficionado es un diodo emisor de luz (LED), que genera luz de un color perfectamente definido cuando lo atraviesa una corriente eléctrica. Lo contrario también ocurre: la luz incidente sobre un LED genera una corriente eléctrica fácilmente detectable. Y aún más, al igual que las emisiones del diodo se producen sólo dentro de una estrecha banda de longitudes de onda, el diodo genera corriente sólo cuando es estimulado por luz comprendida dentro de una estrecha gama de colores.

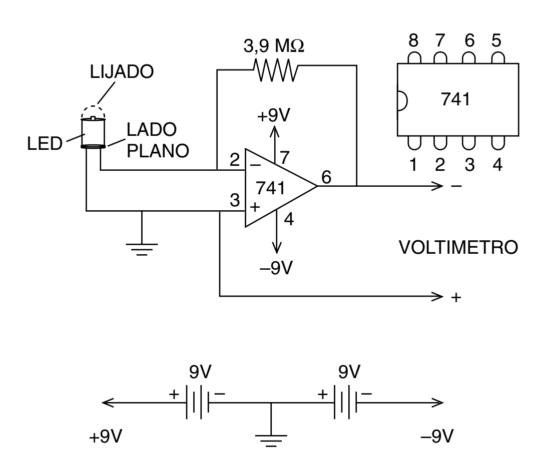
El instrumento emplea un LED verde (Radio Shack 276-022A), que emite luz en torno a los 555 nanometros y la detecta hacia los 525 nanometros. El resto del circuito se compone de una resistencia, un amplificador operacional, dos baterías de nueve voltios y un voltímetro. El conjunto se encierra en la caja de un videocasete VHS, a la que se le practica un orificio que deje pasar la luz (*véase la figura 1*).

1. El sensor de nieblas cabe en una caja de videocasete. Las escuadritas sirven para apuntar la caja al Sol y también para calcular el ángulo solar, si se las usa junto con el nivel

Dos pequeñas escuadras montadas en el costado de la caja permiten alinear el instrumento directamente con el Sol. (Si es posible, conviene fijarlas con una pistola de cola caliente para que la sujeción sea rígida.) Sobre la inferior se coloca una tirita de papel blanco. Se abre la caja y se apunta al Sol, moviéndola lo necesario para que los rayos solares que pasan por el agujero de la caja vayan a dar sobre el diodo. Si las escuadras están más o menos alineadas, en algún lugar del papel blanco aparecerá una segunda imagen del Sol; se marca su centro con un lápiz.

Puede que la caja se deforme algo al cerrarla, lo que obligaría a reajustar esa marca. Se cierra la caja y se apunta el instrumento al Sol, moviéndolo luego ligeramente en diversas direcciones mientras se observa el voltímetro; de este modo puede determinarse la orientación que produce el voltaje máximo. Se hace una marca permanente en el centro de la imagen del Sol obtenida en tal posición, con lo que se está listo para iniciar la tarea.

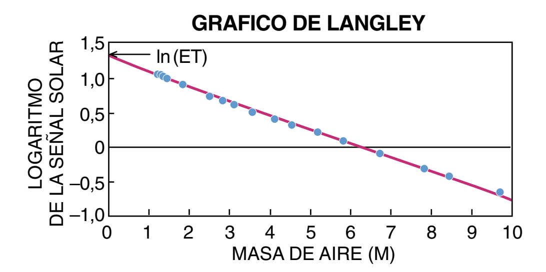
Aunque podría empezarse sin más a recoger datos, al final siempre habrá que calibrar el instrumento. Habrá que dedicar medio día a hacerlo (desde primera hora de la mañana hasta el mediodía solar, o bien desde el mediodía solar hasta primera hora del atardecer) de uno en que el cielo sea de un azul nítido y tenga pocas o ninguna nube. Primero se anota la señal a oscuras, es decir, la tensión que se lea en el voltímetro cuando no incida luz en el detector. Basta con tapar la abertura solar y anotar la tensión. Este número habrá que restarlo de todas las medidas que se obtengan.



2. El circuito del sensor es de construcción sencilla

Midiendo la niebla

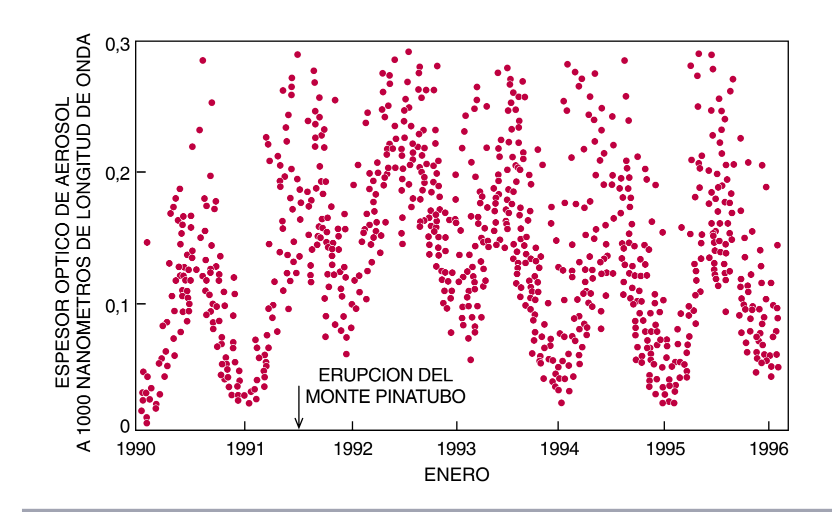
El espesor óptico de aerosol (EOA) es el número que en definitiva expresa las mediciones realizadas sobre una niebla. Para calcularlo hay que sustraer la tensión a oscuras del fotodetector y compensar el efecto de la dispersión de Rayleigh y el ángulo de sol. La fórmula es



$$\text{EOA} = [\ln(\text{ET}) - \ln(\text{Vs} - \text{Vd}) - (M \times P)/8660]/M,$$

donde ET es la constante extraterrestre (la señal que se mediría por encima de la atmósfera), Vs es la tensión medida, Vd es la tensión a oscuras, M es la masa de aire (calculada según el ángulo de sol) y P es la presión atmosférica en milibares. La constante 8660 es un valor empírico para la dispersión de Rayleigh en la longitud de onda detectada por el diodo utilizado.

El gráfico inferior muestra el EOA obtenido por Forrest Mims desde su casa de Seguin (Texas). Se percibe claramente la variación estacional, siendo los cielos veraniegos mas neblinosos que los de invierno.



Se mide la tensión cada veinte minutos mientras el Sol esté alto en el firmamento y cada siete minutos cuando esté bajo. Además hay que anotar siempre la hora, el estado del cielo en las proximidades del Sol y el ángulo del sol con el horizonte. (Para conservar la fiabilidad de los datos, conviene recalibrar el instrumento al menos una vez al año.)

Para terminar con la calibración, hay que representar gráficamente los datos. Se calcula primero la masa de aire correspondiente a cada medición, es decir, la altura de la columna de aire que hay entre el observador y el Sol; se ha convenido que su valor sea 1,0 cuando el Sol está directamente en el cenit (a 90 grados del horizonte) e infinito en el ocaso. La fórmula es 1/sen (ángulo de Sol). Tras realizar la corrección correspondiente a la tensión a oscuras, se hace una gráfica logarítmica de las medidas proporcionadas por el fotodetector en función de la masa de aire. El resultado recibe el nombre de gráfico de Langley y debe ser una recta hasta valores de la masa de aire de 10 aproximadamente.

Si se extrapola la gráfica hasta una masa de aire cero (*véase la gráfica superior*), se obtendrá el logaritmo de la tensión que daría el instrumento si se le pudiera emplear para medir la intensidad luminosa del Sol por encima de la atmósfera, que es la llamada constante extraterrestre, o ET. Esta constante es el punto de partida para calcular el espesor óptico de aerosol, número que sirve para cuantificar una niebla.

Puede obtenerse más información sobre este proyecto en la página de la Society for Amateur Scientists en http://www.thesphere.com/SAS/.

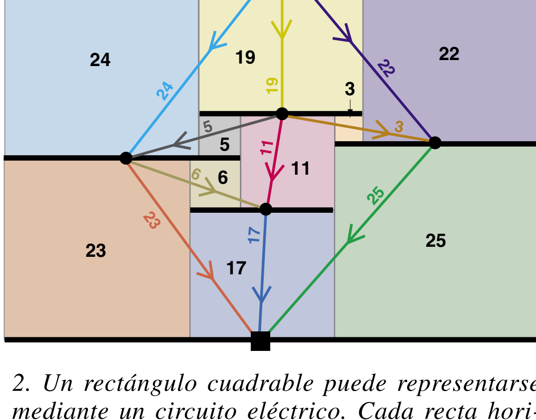
Ian Stewart

La cuadratura del cuadrado

La cuadratura del círculo es problema que se remonta a los antiguos griegos; en cambio, el de la cuadratura del cuadrado es más reciente. ¿Se puede teselar un cuadrado con losetas cuadradas? Fácil, se podría decir. Pensemos, por ejemplo, en un tablero de ajedrez, en el que 64 escaques cuadrados embaldosan el cuadrado grande. Hay, por ello, que respetar una condición adicional, a saber: todas las losetas han de tener distinto tamaño.

Max Dehn demostró en 1903 que si un rectángulo se puede embaldosar con cuadrados, las dimensiones de las losetas y las del propio rectángulo han de ser conmensurables, esto es, han de ser todas múltiplos enteros de un mismo número. Por consiguiente, eligiendo una unidad de medida idónea, todos los lados serán enteros. Este teorema ha recibido al menos una docena de demostraciones diferentes desde aquella fecha, todas ellas de gran perspicacia.

Diremos que un rectángulo o un cuadrado es cuadrable si es posible embaldosarlo con losetas cuadradas, todas diferentes. El primer rectángulo cuadrable, que mide 33 × 32, fue descubierto en 1909 por Z. Morón. Se puede teselar con nueve losetas cuadradas de lados 1, 4, 7, 8, 9, 10, 14, 15 y 18. Tal vez los lectores gusten de construir un juego de losetas y recomponer este rompecabezas; la solución se puede ver en *Unsolved Problems in Geometry*, por Hallard T. Croft, Kenneth J. Falconer y Richard K. Guy (Springer-Verlag, Nueva York, 1991). Morón consiguió también embaldosar un rectángulo de 65 × 47 con 10 losetas cuadradas (*véase la figura 2*).

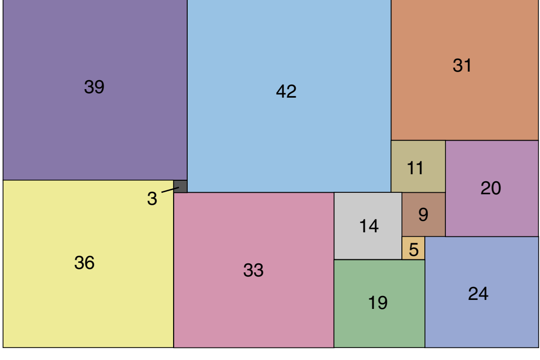


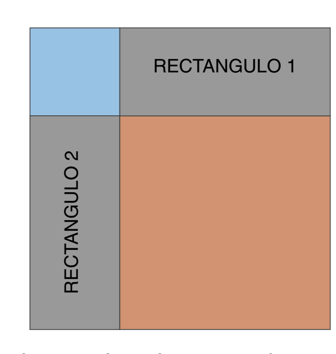
2. Un rectángulo cuadrable puede representarse mediante un circuito eléctrico. Cada recta horizontal corresponde a un nodo. La corriente entra por el nodo superior y sale por el inferior; la intensidad que pasa por cada hilo es igual al lado del cuadrado que representa

R. Sprague resolvió en 1939 el problema del "cuadrado cuadrable" con un enlosado con 55 baldosas diferentes. Su solución, por desdicha, no era de elegancia perfecta, pues contenía un rectángulo cuadrable más pequeño. Los embaldosados que no contienen rectángulos cuadrables se denominan "simples" y son los más difíciles de hallar.

Allá por 1940, R. L. Brooks, C. A. B. Smith, A. H. Stone y W. T. Tutte descubrieron el primer cuadrado cuadrable simple. Martin Gardner ha descrito de forma muy amena el método que utilizaron en *More Mathematical Puzzles and Diversions* (Penguin Books, Londres, 1977). El equipo empezó procediendo a representar la estructura de cualquier rectángulo cuadrable mediante una red, que se llama diagrama de Smith. Cada línea horizontal del rectángulo cuadrable corresponde a un nodo de la red y cada una de las teselas que lo embaldosan, a un lado o arista de la red. Este lado conecta los dos nodos correspondientes a las rectas horizontales que definen los bordes superior e inferior de la loseta; los lados están rotulados con el tamaño de esa loseta.

Es curioso que, si imaginamos que cada lado del diagrama



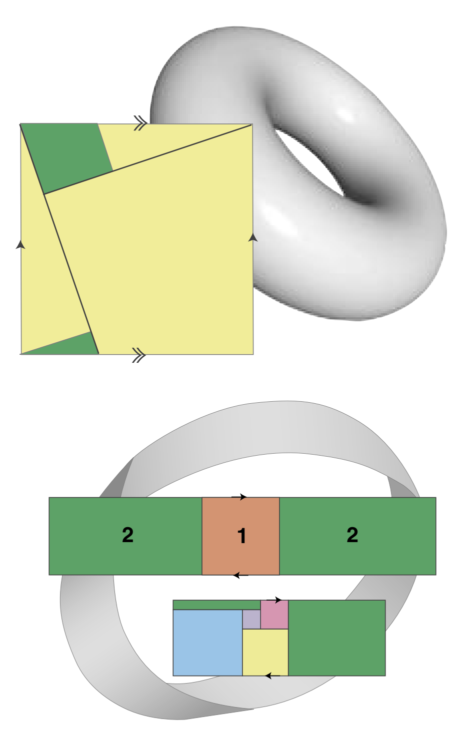


1. Un mismo juego de losetas permite teselar de dos modos distintos el rectángulo de 112 × 75 (izquierda). *Por otra parte, dos rectángulos iguales, teselados con losetas distintas, permitirían crear un cuadrado cuadrable mayor que ambos* (derecha)

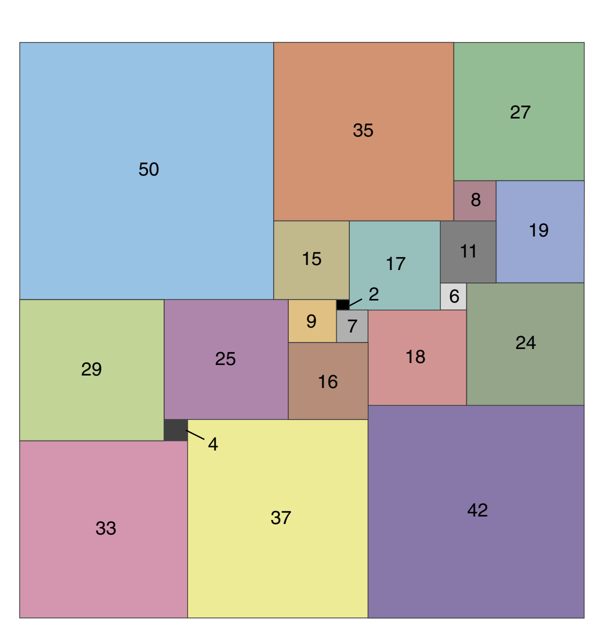
de Smith es un hilo eléctrico cuya resistencia es de una unidad e interpretamos que los números que los rotulan son intensidades de corrientes eléctricas que fluyen por esos hilos (medidas, por ejemplo, en amperios), resulta que el diagrama completo forma un circuito eléctrico en el que se cumplen las conocidas "leyes de Kirchhoff" de la electrodinámica. Si se atribuyen signos contrarios a las corrientes que fluyen en direcciones opuestas, dichas leyes adoptan la forma:

1. La suma de las intensidades que confluyen en un terminal es igual a cero, excepto en los nodos en que la corriente entra o sale del circuito.
2. En toda malla cerrada, la suma de las corrientes es cero.

La validez de estas leyes en nuestro problema se deduce sin dificultad de las propiedades geométricas del teselado. Por ejemplo, la segunda ley implica que la suma de los lados de los cuadrados adosados al lado vertical izquierdo es igual a la suma de los lados de los que corren por el lado derecho, cosa evidente. Utilizando principios tomados de la teoría de circuitos eléctricos, los cuatro matemáticos desarrollaron métodos sistemáticos para la construcción y análisis de rectángulos cuadrables, puestas sus miras en el hallazgo de un cuadrado cuadrable simple.



4. El toro (arriba) *y la banda de Möbius admiten teselaciones especiales. Los lados señalados con flechas del mismo tipo han de ser pegados de modo que las flechas apunten en la misma dirección. Al hacerlo, las regiones verdes se combinan y forman losetas cuadradas*



3. El único cuadrado cuadrable con el mínimo número de losetas

El primer avance llegó desde donde menos se pensaba. Brooks había encontrado un rectángulo de 112×75 cuadrable con 13 losetas y había construido con ellas un rompecabezas. Su madre probó a recomponerlo y lo logró, pero al hacerlo encontró una solución distinta. Era la primera vez que nuestros matemáticos se topaban con tal fenómeno: un juego de losetas cuadradas capaz de embaldosar de dos formas un mismo rectángulo. Lo que sí esperaban encontrar era dos rectángulos cuadrables del mismo tamaño que no tuvieran ninguna loseta en común, porque en tal caso, sin más que añadir dos cuadrados más, sería muy fácil formar un cuadrado cuadrable. Aunque tal cuadrado sería compuesto, podría servir de punto de partida.

El rectángulo de Brooks no podía servir de base para un cuadrado cuadrable, pues el mismo juego de losetas se usaba dos veces. Pero al examinar los diagramas de Smith de los dos teselados, los matemáticos se percataron de que cortocircuitando dos nodos de uno de los diagramas, situándolos uno encima del otro, podían obtener un nuevo diagrama. Los dos puntos así "identificados" —lo que en la jerga matemática significa considerar como idénticos dos objetos en apariencia distintos— se hallaban al mismo potencial eléctrico; en consecuencia, el flujo eléctrico no sufría perturbación.

Este indicio les sirvió para desarrollar nuevas formas de manipulación de los diagramas de Smith. El método acabó mostrándose fecundo y les condujo hasta una cuadrado cuadrable simple formado por 69 losetas. Poniendo aún mayor empeño, Brooks consiguió reducir a 39 el número de losetas.

T. H. Willcocks había descubierto en 1948 un cuadrado cuadrable de sólo 24 losetas. Pero tal cuadrado no era simple. En el ínterin, J. W. Bouwkamp y sus colegas estaban catalogando todos los posibles rectángulos cuadrables con un máximo de 15 losetas, hallando un total de 3663. A. W. J. Duivestijn demostró en 1962 que todo cuadrado cuadrable simple ha de contener al menos 21 losetas; en 1978 consiguió hallar un cuadrado tal y demostrar que era único. Bouwkamp y Duivestijn publicaron 207 cuadrados cuadrables simples que requerían de 21 a 25 losetas en 1992; esa lista es, en realidad, la lista completa de los cuadrados de ese tipo.

Es cierto que estos resultados dejan prácticamente liquidado el problema del cuadrado cuadrable. Pero cabe un sinfín de variantes. ¿Qué ocurre, por ejemplo, con los dominós cuadrables —rectángulos cuadrables que tienen un lado doble del otro—? Hay una forma trivial de "cuadratura" de tales rectángulos: se parte de un cuadrado cuadrable y se le adosa una sola loseta cuadrada, de tamaño igual al del cuadrado cuadrable completo. Pero ¿existen soluciones no triviales?

Otra generalización consiste en pavimentar superficies no rectangulares, posibilidad que examina David Gale en su sección de "Mathematical Entertainments" del *Mathematical Intelligencer*. En topología se sabe que es posible construir cierto número de superficies interesantes por "identificación" de los lados opuestos de un rectángulo —pegando sus bordes, aunque sólo sea con la imaginación—. Tomemos un rectángulo y peguemos dos lados opuestos: se obtiene un

cilindro. Demos al rectángulo una torsión de media vuelta antes de pegar los lados y obtendremos una banda de Möbius. Peguemos entre sí ambos pares de lados opuestos, sin torsión, y resultará un toro —una superficie con forma de rosquilla— con su agujero central y todo. Peguemos ambos pares de lados opuestos, dando a uno de los pares una torsión de media vuelta y resultará una botella de Klein —célebre superficie de una sola cara que no puede ser construida sin que se corte a sí misma en el espacio tridimensional—. Demos media vuelta a los dos pares de lados y obtendremos un plano proyectivo, que también tiene una sola cara y que es imposible de representar en tres dimensiones.

Resulta claro que cualquier teselación del rectángulo se traduce en una teselación de la superficie resultante. Pero puede que la superficie admita teselaciones nuevas, porque sus losetas pueden ahora traspasar los bordes que han sido pegados. Por ejemplo, en la figura 4 podemos ver una banda de Möbius teselada con sólo dos cuadrados, de lados 1 y 2, respectivamente. Las flechas indican qué lados han de pegarse. Aunque uno de los cuadrados de la figura parece estar dividido en dos rectángulos, estas piezas forman un todo al pegar sus bordes. Esta teselación de la banda de Möbius tiene, desdichadamente, una característica desagradable: la loseta pequeña tiene frontera común consigo misma. Sus bordes superior e inferior quedan pegados, por lo que en realidad no es un cuadrado, sino una banda de Möbius. S. J. Chapman descubrió en 1993 un teselado de la cinta de Möbius que carece de este rasgo, utilizando ahora cinco teselas (*banda inferior*). No existen teselaciones similares con menor número de losetas.

También puede ser cuadrable un cilindro, pero hacen falta como mínimo nueve losetas, lo mismo que en los rectángulos. Las soluciones "triviales" consisten en tomar rectángulos de Morón y unir los bordes adecuados. Pero también existen dos soluciones no triviales con 9 losetas, cuyos tamaños son los mismos que los de Morón.

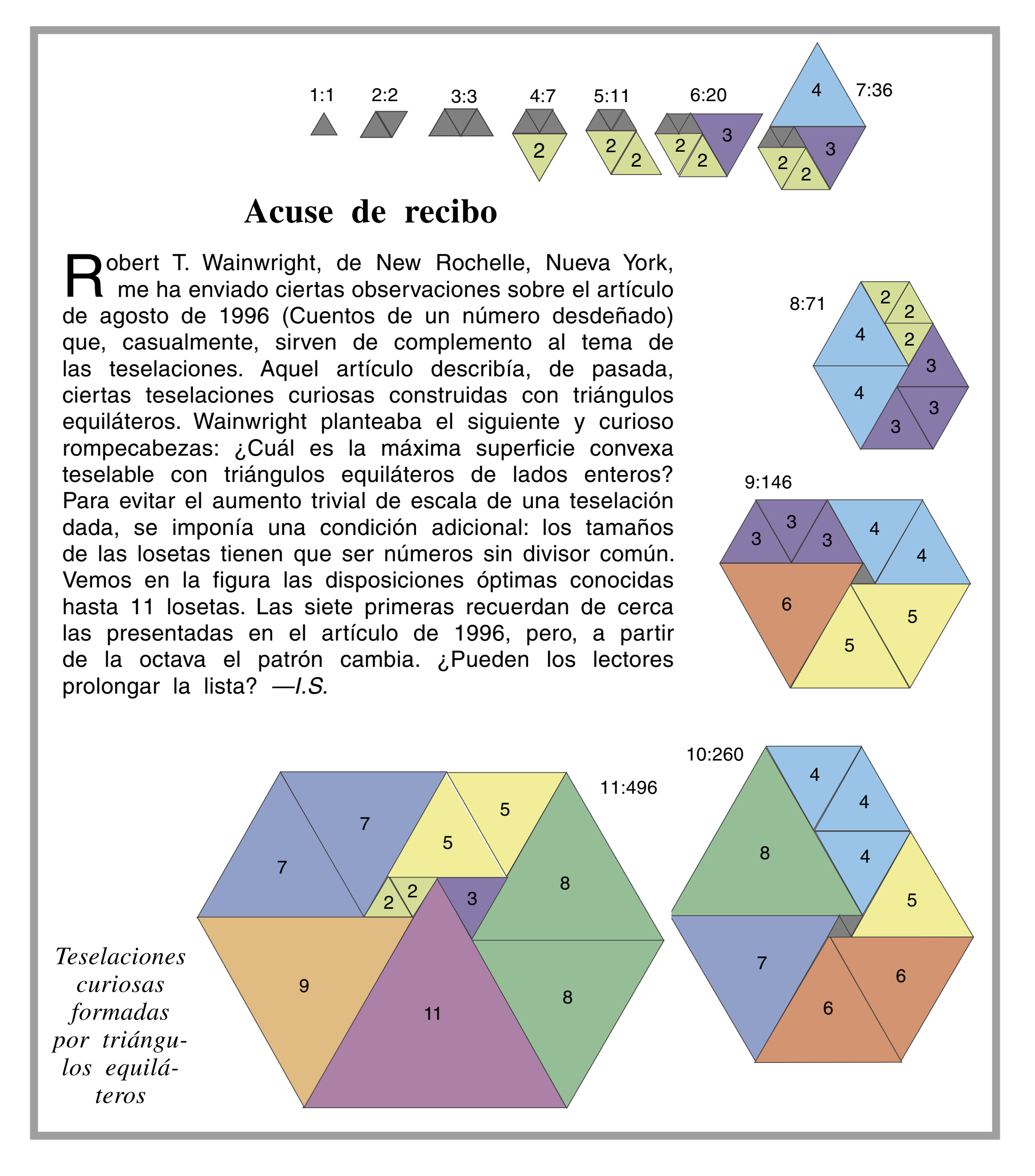
En los casos del cilindro y de la banda de Möbius, los lados de las teselas tienen que ser paralelos al borde o bordes de la superficie. Pero ni el toro, ni la botella de Klein, ni el plano proyectivo tienen borde, por lo que las losetas podrían, es de presumir, ser adosadas oblicuamente. De hecho, en tal caso, el toro puede ser embaldosado con sólo dos cuadrados, si consentimos que se encuentren dos lados de la misma loseta. (Y de regalo, agazapada en esta figura tenemos una demostración del teorema de Pitágoras. ¿Se ha dado cuenta?)

No parece saberse gran cosa de las teselaciones de la botella de Klein. Cada teselación de una banda de Möbius puede pegarse a lo largo de su borde (¡sólo tiene uno!) generando así una teselación de la botella de Klein; no hay otros métodos para teselar la botella de Klein con seis losetas cuadradas o menos. Se ignora si ocurre otro tanto en el caso de siete u ocho losetas, aunque es, con certeza, falso en el caso de nueve.

No se sabe prácticamente nada sobre teselaciones del plano proyectivo. ¿Y qué podríamos decir, sea por caso, de la superficie del cubo? Es territorio virgen y espero con el mayor interés la aportación de los lectores.

Soluciones de los problemas de factorización del mes pasado:

777923 = 821 × 883;
603181 = 641 × 941;
21720551 = 211 × 311 × 331.



Acuse de recibo

Robert T. Wainwright, de New Rochelle, Nueva York, me ha enviado ciertas observaciones sobre el artículo de agosto de 1996 (Cuentos de un número desdeñado) que, casualmente, sirven de complemento al tema de las teselaciones. Aquel artículo describía, de pasada, ciertas teselaciones curiosas construidas con triángulos equiláteros. Wainwright planteaba el siguiente y curioso rompecabezas: ¿Cuál es la máxima superficie convexa teselable con triángulos equiláteros de lados enteros? Para evitar el aumento trivial de escala de una teselación dada, se imponía una condición adicional: los tamaños de las losetas tienen que ser números sin divisor común. Vemos en la figura las disposiciones óptimas conocidas hasta 11 losetas. Las siete primeras recuerdan de cerca las presentadas en el artículo de 1996, pero, a partir de la octava el patrón cambia. ¿Pueden los lectores prolongar la lista? *—I.S.*

Teselaciones curiosas formadas por triángulos equiláteros

Biología del desarrollo

Despliegue

DEVELOPMENTAL BIOLOGY, por Werner A. Müller. Springer; Heidelberg, 1997. **LANDMARKS IN DEVELOPMENTAL BIOLOGY**. 1883-1924. Klaus Sander *et alii*. Springer; Berlín, 1997.

EMBRYOGENESIS. THE GENERATION OF A PLANT. Dirigido por T. P. Wang y A. Cuming. Bios Scientific Publishers; Oxford, 1996. **LAZZARO SPALLANZANI. I GIORNALI DELLE SPERIENZE E OSSERVAZIONI. IL GRANDE GIORNALE (OPUSCOLI, 1776)**. Introducción de Carlo Castellani. Giunti; Florencia, 1994.

EARLY VERTEBRATES, por Philippe Janvier. Clarendon Press-Oxford University Press; Oxford, 1996. **MODELS IN PHILOGENY RECONSTRUCTION**. Dirigido por Robert W. Scotland, Darrell J. Siebert y David M. Williams. Clarendon Press; Oxford, 1994.

Todo apunta a que el verdadero motor de la evolución y su apoyo más sólido se esconde en la biología del desarrollo. Lo que la anatomía comparada supuso para la teoría darwinista en el siglo xix, lo es para nuestros días el espectacular avance de la embriología.

No ha sido fácil esa convergencia de la embriología con la evolución. Mientras ésta forjaba la síntesis neodarwinista mediante el encaje de la selección natural en la genética de los caracteres hereditarios, la embriología se ocupaba de identificar los mecanismos físicos subyacentes a la adquisición de una forma definida. Avanzados los setenta, los paleontólogos llamaron la atención sobre las posibilidades de las fases de desarrollo para explicar el curso evolutivo. La idea estaba, pues, en el aire cuando, mediados los ochenta, se afilaron las herramientas para abordar el estudio de los genes del desarrollo.

Muy pronto aparecieron las sorpresas. La de mayor calado: se activan genes similares en especies muy alejadas entre sí para, en numerosas ocasiones (aunque no siempre), cumplir idénticas funciones. Mamíferos y moscas de la fruta, por ejemplo, comparten un gen parecido—llamado *Pax*6 en ratones y *eyeless* en moscas— que dicta el desarrollo del ojo, órgano del que antaño se creía haber evolucionado de manera independiente en vertebrados y en invertebrados. Hace unos meses, Linda Holland extendía el paralelismo entre vertebrados e invertebrados nada menos que a la segmentación del cuerpo. El gen *engrailed* divide al embrión de *Drosophila* en segmentos; igual que en *Amphioxus*, animal marino muy próximo a los protovertebrados. De ello infieren los biólogos que la segmentación emergió en el curso evolutivo una sola vez, a partir de un antepasado común a vertebrados e invertebrados.

Werner A. Müller ha sistematizado los principios fundamentales en *Developmental Biology*. Todas las células somáticas se originan a partir del cigoto por continuas divisiones mitóticas, pero no alcanzan plena autonomía. Las células somáticas sólo son viables en asociación. Por mor de la sociedad supraindividual —el organismo—, las células ejercen tareas distintas. Se diferencian así morfológica y funcionalmente y, en conjunto, construyen estructuras pluricelulares, tejidos y órganos. En este proceso, las células crean las mismas estructuras y patrones en idéntico orden espacial y temporal, de generación en generación.

La capacidad de multiplicación se confiere a los organismos a través de la información genética (ADN del núcleo y determinantes citoplasmáticos). Sin embargo, la organización final no se halla enteramente cifrada en dicha información. No es del todo exacto que el genoma entrañe un *Bauplan*, un plano arquitectónico o proyecto del cuerpo. No podemos atribuirle un diseño detallado de los trillones de contactos sinápticos de un nuestro cerebro. El genoma señala cómo sintetizar proteínas, ARNr o ARNt y cómo producir replicas del propio ADN. Incorpora, además, cierta organización jerárquica, con genes maestros y genes subordinados. Contiene, por fin, elementos de un programa espaciotemporal para controlar el orden de expresión génica.

La partición celular puede tomar dos formas: holoblástica (total), en la que el óvulo fecundado se subdivide por entero, y meroblástica (parcial), en que no se divide completamente, al menos no en el comienzo de su desarrollo. Allí donde se produce una partición holoblástica (erizo de mar y rana), las células hijas se denominan blastómeros. Ejemplos de partición meroblástica son la superficial de los insectos y la discoidal de los peces, reptiles y aves. Aun cuando la división proseguirá, la partición se considera concluida cuando se alcanza el estadio de blástula, suerte de esfera hueca de células cuyo interior se rellena con vitelo. La pared celular, epitelial, de la esfera se denomina blastodermo y el interior, blastocele.

El desarrollo prosigue con la gastrulación, o desplazamiento hacia el interior de la blástula. Se trata de un período de cambios drásticos e irreversibles. La transcripción de ARN recupera grandes cantidades de información genética, para sellar el umbral de la individualidad. Es un punto sin retorno de la determinación embrionaria. Se constituyen las capas germinales. Según adquiera el embrión dos o más capas germinales, lo llamaremos diploblástico o triploblástico. Animales diploblásticos, es decir, con sólo ectodermo y endodermo, son las esponjas y los celenterados. En los animales que superen ese nivel de organización, la gastrulación inserta una hoja ulterior entre el rudimento de aparato digestivo (endodermo) y la pared externa (ectodermo), el mesodermo. El mesodermo es una capa extremadamente versátil. Por norma formará los músculos, el tejido conjuntivo, los vasos sanguíneos, los revestimientos epiteliales, etcétera.

Entre las especies más caras a los embriólogos destacan los erizos de mar. Debemos a Hans Driesch un experimento clásico y de extraordinaria resonancia teórica. Al separar los dos primeros blastómeros en el estadio de dos células, cada blastómero engendraba una larva. Aunque su tamaño respectivo resultaba ser la mitad del volumen de una larva normal, la reducción en ambas larvas estaba armó-

nicamente distribuida. Eran idénticas, cual gemelos monozigóticos. Pero si los blastómeros se separaban en el estadio de cuatro células, se formaban cuadrupletes. Cada blástula podía bisecarse, resultando gemelos idénticos, siempre que se biseccionara antes del comienzo de la gastrulación y el corte se ejecutara a lo largo del eje animal-vegetal. Driesch concluyó que los organismos vivos no eran meras máquinas, porque las piezas de una máquina no pueden autoabastecerse para restablecer la máquina entera.

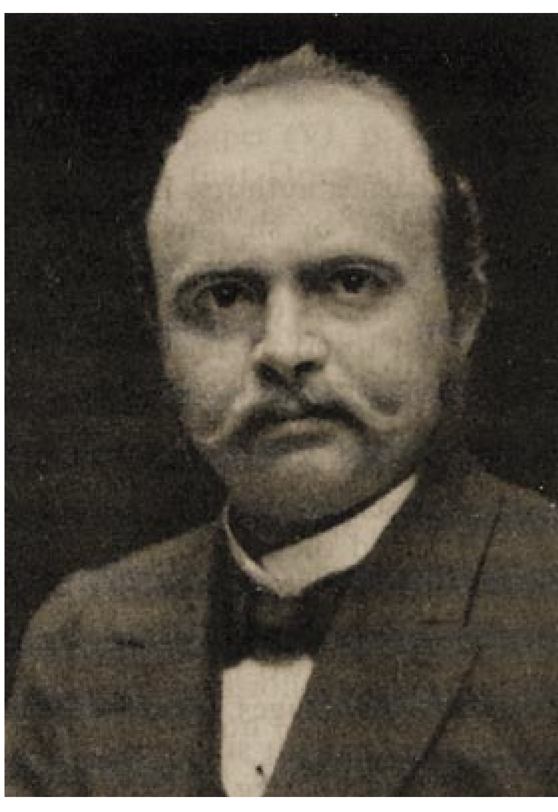
Aunque todavía los huevos de erizo siguen siendo el sistema ideal para abordar la fecundación, activación y ciclo celular embrionario, otros aspectos de la investigación no pueden acometerse con ellos. El recurso a las mutaciones resulta inviable en unos organismos que invierten tanto tiempo en la generación. Por eso los biólogos fijaron la mirada en un nemátodo, *Caenorhabditis elegans*. Este gusano transparente es hermafrodita, predominantemente. Los hermafroditas tienen cromosomas sexuales XX y son hembras en apariencia y en anatomía, pero están capacitados para producir no sólo óvulos, sino también espermatozoides.

Otra especie habitual en los laboratorios de los embriólogos es *Drosophila melanogaster*. Su ciclo de vida rápido, fácil cruzamiento y sus cromosomas politénicos gigantes, que permiten la localización de genes, convirtieron a la mosca de la fruta en modelo insuperable para los análisis de herencia. Su instalación privilegiada en los trabajos de biología del desarrollo tuvo que ver con la introducción, en 1978, del complejo de genes homeóticos por E. B. Lewis.

Los ejes primarios o coordenadas predeterminan la arquitectura bilateralmente simétrica del cuerpo de la mosca. Para alcanzar tal organización, deben establecerse dos ejes: el eje anterior-posterior y, perpendicular al mismo, el eje dorsoventral. En *Drosophila*, la determinación del eje ocurre bajo la influencia de los genes, pero son los genes de la madre, no los del mismo embrión, quienes establecen las coordenadas.

Hubo que recorrer un largo camino hasta la definición de los conceptos básicos. Nada mejor, pues, que releer su acotación gradual en los artículos fundantes de la biología del desarrollo. No sólo por curiosidad retrospectiva, sino, sobre todo, porque permiten volver a pensar los mismos temas con otra óptica. Es el caso de la inversión de la región dorsal en vertebrados y artrópodos, cuestión resaltada en *Landmarks in Developmental Biology*.

La idea de que la región ventral de los insectos y otros artrópodos corresponde a la región dorsal de los vertebrados se ha esgrimido en repetidas ocasiones desde comienzos del xix. En 1822 E. Geoffroy Saint-Hilaire, al observar un crustáceo panza arriba, asoció su anatomía a la del hombre en orientación inversa, con el sistema nervioso central alojado por encima del tracto digestivo y el tracto digestivo por encima del corazón. Extrajo la conclusión de que el plano corporal de los vertebrados era el plano corporal de los artrópodos vuelto al revés.



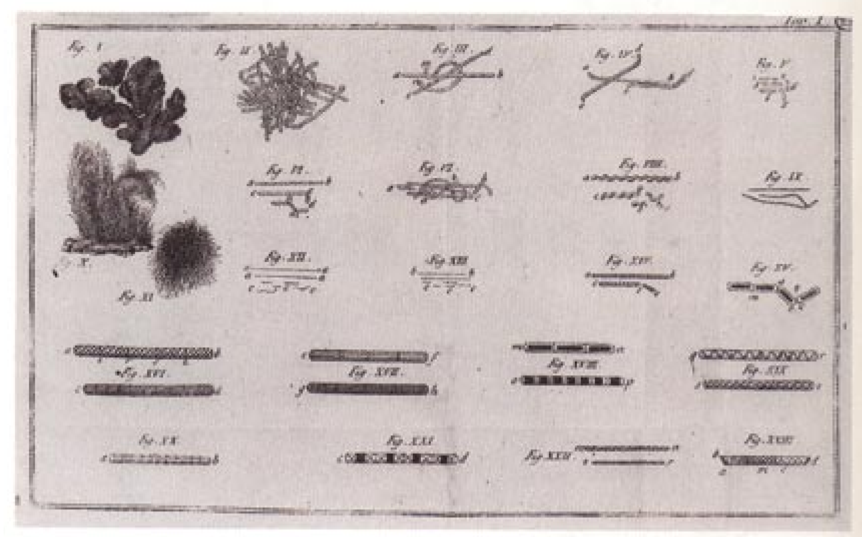
Hans Driesch (1867-1941) puso las bases de la embriología moderna con sus experimentos sobre erizos de mar

Saint-Hilaire propuso la *unité de plan*, según la cual todos los planos corporales del reino animal, pese a sus enormes diferencias morfológicas, eran variaciones de uno principal. Sugería, por ejemplo, que los arcos branquiales de los peces se correspondían con la laringe de los tetrápodos superiores (lo que se acepta hoy) y que el opérculo de los peces se correspondía con los huesecillos del oído medio de los tetrápodos (lo que se rechaza hoy). Georges Cuvier se opuso al plan único. En su opinión, el reino animal se organizaba en torno a cuatro grupos distintos: *Vertebrata, Articulata, Mollusca* y *Radiata* (celentéreos y equinodermos), con fronteras insalvables entre un grupo y otro.

Pero la idea de un solo plan no desapareció. Las descripciones sobre el desarrollo de los artrópodos acostumbraban cerrarse con la comparación entre embriones de artrópodos y de vertebrados. Martin Heinrich Rathke investigó la anatomía de *Amphioxus* (considerado hasta entonces larva de molusco), así como la embriología y anatomía de crustáceos, moluscos, vermes y vertebrados. Aunque reconocía que la región ventral de los artrópodos se correspondía con la región dorsal de los vertebrados, insistía en que, avanzado ya el desarrollo, vertebrados y articulados empezaban a alejarse; es más, rechazaba que el cordón nervioso de los articulados tuviera que ver con el de los vertebrados.

Rudolf Albert Kölliker postuló que los embriones de los vertebrados tendían a atravesar un estadio primitivo, transitorio y parecido al de los artrópodos, antes de alcanzar su organización característica. Afirmó incluso que, desde el punto de vista funcional, la región ventral de los articulados era la dorsal, puesto que se correspondía con la dorsal de los vertebrados. Karl Ernst von Baer admitía que durante las fases iniciales del desarrollo la región ventral de los articulados era similar a la región dorsal de los vertebrados y que, por tanto, los respectivos cordones neurales se correspondían mutuamente. Pero de ahí a aceptar una vinculación filogenética mediaba un abismo. Por muchos rasgos que compartieran en la embriogénesis (la banda bilateral simétrica, por ejemplo), abundaba Gustav Zaddach, no es verdad que "los artrópodos, comparados con los vertebrados, vuelven su región dorsal hacia el suelo y la región ventral hacia el cielo". No puede considerarse, agregaba Ernst Haeckel, que el cordón nervioso de los artrópodos





Tablas de las Osservazioni microscopiche sulla tremella e sulla circolazione del fluido in una pianta acquaiola*, de Bonaventura Corti, 1774*

sea estructura homóloga del conducto nervioso de los vertebrados.

Muy de otra manera pensaba Franz Leydig, quien, tras cotejar el sistema nervioso de ambos grupos, llegó a la conclusión de que los ganglios supraesofágicos e infraesofágicos (la masa cerebral) de los artrópodos se correspondían con el cerebro de los animales superiores. Además, la posición ventral del cordón nervioso de los articulados, contrapuesta a la posición dorsal del cordón nervioso de los vertebrados, indicaba o bien que el cordón dorsal se trasladaba a las regiones ventrales o que el organismo entero había invertido su situación, de suerte que el articulado venía a ser un vertebrado vuelto al revés.

En plena efervescencia de la embriología comparada Carl Semper descubrió en el pronefros de un tiburón "órganos segmentados", es decir, metanefridios, que él consideró homólogos de los metanefridios de los anélidos. En consecuencia, y discrepando de la opinión entonces dominante de Carl Gegenbaur, estableció la vinculación entre vertebrados y anélidos. Fue más allá y reivindicó la vieja idea de Saint-Hilaire anatematizada por Gegenbaur. Al bando de Semper se adscribió Anton Dohrn, figura señera de la biología marina, quien situó el origen de los vertebrados en un antepasado aneloide. Conjeturó, para diversos órganos, la existencia de estadios intermedios plausibles y funcionales entre los anélidos ancestrales y los cordados.

Medio siglo después de Dohrn y 150 años después de Saint-Hilaire, Adolf Naef reavivó la hipótesis de los anélidos. Naef se proponía establecer la ontogénesis arquetípica de un celomado ideal, de organización bilateral y segmentada, antepasado común de anélidos y cordados. Tal antepasado vermiforme de los cordados viviría enterrado en la arena o el lodo donde la orientación dorsoventral careciera de importancia, como en el caso de algunos hemicordados vivos, por ejemplo, *Balanoglossus*. Partiendo de este antepasado común hipotético, reconstruyó entonces las características principales de una ontogénesis ancestral de los cordados.

La genética molecular parece venir en auxilio de los defensores de la *unité de plan* de articulados y cordados, con la inversión del eje dorsoventral en uno de estos grupos. Hace tres años escasos, Eddy de Robertis y Yoshiki Sarai descubrieron en ranas el gen *chordin*, responsable del asentamiento dorsal de las células de un lado del embrión y ventral las del otro. Vincent François y Ethan Bier hallaron, más tarde, un gen similar, llamado *sog*; las células de la mosca de la fruta en las que se expresa el gen *sog* se hacen ventrales, en tanto que las células de los vertebrados que expresan el gen *chordin* se hacen dorsales. Semejante disposición induce a sospechar la existencia de un precursor *sog/chordin*, determinante del eje dorsoventral en un animal del tipo gusano. Cambios en el desarrollo temprano invertirían el eje, y, con ello, la pauta de expresión del gen.

Un tanto rezagada ha procedido la embriología vegetal con respecto a la animal. Sin embargo, es mucho lo conseguido en los últimos años, según se desprende de *Embryogenesis. The generation of a plant.* Los grupos privilegiados son las crucíferas, gramíneas y leguminosas. Aquí también se parte del cigoto, primera célula de la generación esporofítica. El cigoto porta toda la información genética necesaria para construir el organismo adulto. En las angiospermas, el embrión se aloja en el saco embrionario, él mismo encerrado en los tejidos del óvulo. Al igual que en los metazoos, los embriones vegetales deben establecer la polaridad, controlar la proliferación celular y formar tejidos y órganos.

Las primeras investigaciones en embriología de angiospermas se remontan al último tercio del siglo pasado, instadas por el afán de desentrañar la sexualidad vegetal, los rasgos estructurales básicos de los elementos masculinos y femeninos de la flor. Pero la experimentación sistemática empezó cien años antes. De una forma tan elemental, que, sin perspectiva histórica, la despreciaríamos. Constituye,

sin embargo, el punto de arranque de la experimentación biológica. Con ese criterio hemos de acercarnos *a Lazzaro Spallanzani. I Giornali delle Sperienze e Osservazioni*.

Spallanzani se proponía explorar y estudiar los procesos de regeneración, investigar los fenómenos vitales del mundo animal y vegetal. Intuía la fundamental uniformidad de los procesos vitales en ambos reinos, una cuestión a la que un siglo después Claude Bernard dedicó un ciclo entero de lecciones. Anticipándose también a Bernard acotaba las relaciones entre "aires" y factores que regulan los procesos fundamentales de la materia viva.

Su cuaderno de laboratorio, su *Gran Diario*, lo empezó el 12 de julio de 1770 y llega hasta el 19 de septiembre de 1775. En sus páginas se consignan sin solución de continuidad experimentos con infusorios, vermículos espermáticos, germinación de semillas sometidas a temperaturas extremas o encerradas en recipientes sellados y el desarrollo de mohos.

Unos años antes, Spallanzani había desmontado la teoría de Needham sobre la presencia de colonias de infusorios en las soluciones selladas y esterilizadas con el calor. Cuando destruía con "fuego" todos los elementos germinales que hubieran entrado en un recipiente, e impedía con un cierre hermético el acceso del aire exterior (vehículo de nuevas "semillas"), observó Spallanzani, no nacía nada.

Se propuso determinar la correlación entre volumen de aire disponible, germinación de las semillas y aparición de las colonias. Repitiendo los experimentos y las observaciones a intervalos regulares, Spallanzani estableció que existe una relación constante entre la capacidad del recipiente (y, por tanto, volumen de aire) y la presencia o ausencia de vegetales. A él le debemos, pues, el tránsito de una investigación cualitativa a otra cuantitativa. Mide, en efecto, la temperatura máxima y mínima que resisten las semillas.

Sus notas rezuman una meticulosidad y tenacidad notables: "6 de octubre de 1770. Observación de los cinco botellines cerrados herméticamente y hervidos a lo largo de un cuarto de hora; las arvejas. La infusión era obscura y filamentosa. He extraído una gota (para su observación al microscopio) y no he visto más que un agregado de puntos inorgánicos, es decir, materia vegetal deshilachada. La he diluido en agua, observada antes microscópicamente, y no contenía nada." En ese mismo día: "Es necesario admitir que los gérmenes resisten casi el calor del agua hirviendo; los animalillos nacidos de esos mismos gérmenes mueren a los 30, 33 grados (en la escala de Reamur)."

No son, empero, ensayos aleatorios, sino programados: "La segunda serie de experimentos en torno al reino vegetal tendrá dos partes. En la primera me ocuparé de aclarar a qué grado de temperatura perecen las semillas de varias plantas. En la segunda abordaré a qué grado de calor perecen las plantas nacidas de las semillas sometidas a calor." Apenas si podía avanzar más sesenta años antes de que se descubriera la teoría celular.

Como ocurrió con *Drosophila*, los pioneros de la embriología botánica moderna acertaron también al escoger, de entrada, pan y quesillo (*Capsella bursa pastoris*); la especie se convirtió en ejemplo de manual de las primeras fases de la embriogénesis de una dicotiledónea. Se dio otro paso con el descubrimiento de la singamia por Strasburger, al que siguió en, vísperas del cambio de siglo, el del fenómeno de la doble fecundación.

En las plantas, una vez realizada la fecundación, muchas propiedades del óvulo cambian durante las primeras horas de la existencia del cigoto. Reviste particular significación la observación de que la generación de nuevos ribosomas representa parte de la respuesta básica del huevo a la fecundación. En coherencia con esta conclusión, se ha demostrado que, en *Capsella bursa pastoris* y en *Nicotiana rustica*, la fecundación va acompañada de un incremento del contenido de ARN en el cigoto.

Para seguir la trayectoria de una planta desde el cigoto hasta el estado adulto podemos servirnos de otra especie clave en la investigación vegetal, el guisante (*Pisum sativum*). Posee esta planta a su favor un embrión grande y proclividad a la endogamia. Al producir un embrión grande permite el rastreo fácil de ciertos mutantes y aporta material suficiente para el estudio bioquímico y molecular, incluso con mutantes letales para el embrión. Su endogamia mantiene la pureza de cualquier línea mutante, reduciendo la complejidad del trasfondo genético.



Fósil de Sacabambaspis*, uno de los representantes más antiguos de los vertebrados conocidos. Procede del Ordovícico de Bolivia*

En el guisante, tras la fecundación, el cigoto se divide transversalmente en una célula apical y en una célula basal. La célula apical, a su vez, se divide transversalmente. La célula basal, por su parte, se divide longitudinalmente para producir dos células suspensoras; la célula apical transversalmente dividida engendra una célula madre embrionaria, apical, y una célula medial. Esta última, luego, acomete una división longitudinal para formar la pieza medial bulbosa del suspensor. En las cuatro células del suspensor se suceden varios ciclos de división nuclear, sin que se dé citoquinesis. En consecuencia, las dos células basales alargadas contienen 64 núcleos cada una, y cada célula medial posee 32 núcleos. El suspensor es un órgano de corta vida que se desarrolla plenamente en el estadio de proembrión para degenerar después.

La división de la célula madre embrionaria apical produce un embrión globular de simetría axial. El protodermo en el guisante no se forma hasta la etapa globular avanzada. Por contra el ápex del vástago aparece bastante pronto. La iniciación del ápex del tallo acontece por el tiempo en que se establece un protodermo claro (primer signo visible de la diferenciación de tejidos) y antes de la formación de los cotiledones. Para cuando los lóbulos de los cotiledones se dejan observar, se presentan dos capas en el ápex del vástago. La epidermis y las trazas provasculares de los cotiledones no se transforman en un sistema vascular funcional hasta que no comienza la germinación, en cuyo instante el tejido del procambium origina los elementos del xilema y del floema (vasos conductores).

La embriología cede paso a la morfología evolutiva cuando de fósiles se trata. Es lo que encontramos en el libro de Philippe Janvier *Early Vertebrates*. Con él abandonamos el desarrollo de los individuos para adentrarnos en el de las especies y otros grupos superiores. Las cuestiones sobre el origen de los vertebrados se centran, entre otros puntos de interés, en la emergencia de los mandibulados, de vertebrados óseos y de mandibulados tetrápodos. A Janvier, sin embargo, le atrae un punto de vista más dinámico, el de las relaciones entre caracteres (homologías) y entre taxones o grupos. En los cladogramas que se recogen en esta obra sólo se citan en cada nodo las sinapomorfías (estados de carácter derivado o caracteres únicos).

La mayoría de los vertebrados primitivos de los que se ocupa el autor tienen entre 470 y 250 millones de años. Suele tratarse de restos fragmentados y destrozados, que se conservan en rocas muy duras. Los primeros vertebrados conocidos aparecen a comienzos del período Ordovícico, hace unos 470 millones de años. Algunos de ellos abundan en los esquistos y areniscas ordovícicas de la precordillera boliviana. Se encuentran asociados a invertebrados marinos: trilobites y, en particular, braquiópodos lingúlidos. Estos vertebrados ordovícicos eran de morfología elemental, con una cabeza fusiforme, protegida con grandes placas óseas y una cola cubierta con escamas. Carecían de mandíbulas y su boca estaba armada con hileras de placas óseas. Tenían los ojos en el extremo de la cabeza, flanqueando un par de fosas nasales. Presentaban lateralmente opérculos branquiales. Contaban con una sola aleta, la caudal. Ejemplos representativos son *Sacabambaspis*, de Bolivia, y *Arandaspis*, de Australia. Aunque éstos carecían de mandíbulas, quizá hubiera por ese tiempo ya vertebrados mandibulados, pero carecemos de registro fósil que lo avale.

Hacia finales del Ordovícico se produce una glaciación, menos intensa quizá que la del Pleistoceno. Un casquete de hielo cubrió la mayor parte de Africa (que en ese tiempo estaba cerca del polo Sur); la retención de una gran cantidad de agua helada en los continentes provocó el descenso del nivel del mar. No está claro cuál fue el efecto del clima frío sobre la fauna marina, pero se advierte un recorte en la diversidad de especies en las zonas ribereñas.

Tras esta glaciación, en el Silúrico temprano (hace unos 435 millones de años), los vertebrados llenaron los mares. Aparecieron entonces muchos grupos vertebrados, con y sin mandíbulas: pteráspidos (heterostracanos), cefaláspidos (osteostracanos), galeáspidos, telodontos, acantodios, condrictios, placodermos y, posiblemente, osteictios. Carecían de mandíbulas los heterostracanos (emparentados con arandáspidos y astráspidos del Ordovícico), los osteostracanos, los anáspidos y los teolodontos; mandibulados eran los acantodios y los actinopterigios. Medraban en entornos distintos: heterostracanos y osteostracanos vivían cerca de la costa, en lagunas costeras protegidas del oleaje; mientras que anáspidos, telodontos y peces mandibulados eran animales pelágicos que preferían el mar abierto.

Pero Janvier no se limita a recrear la fauna y su entorno, período tras período. Entra en el debate. Por ejemplo, a propósito del origen de las mandíbulas, que la explicación clásica atribuye a la transformación de los arcos branquiales. Esa tesis se apoya en los modelos segmentalistas y, en no menor medida, en la observación según la cual los vertebrados amandibulados poseen arcos pero no mandíbulas, en tanto que los gnatostomos presentan arcos branquiales y mandíbulas. Y así, puesto que ambas estructuras proceden de unas mismas células embrionarias, la cresta neural, parece lógico inferir que las mandíbulas sean caracteres homólogos de los arcos branquiales. Contrapone a esta tesis su propia argumentación para concluir, partiendo de que las mandíbulas siempre fueron tales, que los arcos branquiales no se transforman en mandíbulas, sino que las mandíbulas instan la aparición de nuevos arcos branquiales.

La biología del desarrollo, igual que toda tesis potente, tiende a unificar los campos, a dotarlos de una nueva luz. No ha sido ajena a su influencia la taxonomía, como se nos recuerda en *Models in Philogeny*. La sistemática descansa en comparaciones realizadas entre organismos. Existe una prolífica gama de modelos ideados para establecer los criterios de comparación y evaluar la significación de diferencias y similaridades. Todos sin exclusión se apoyan en el fenotipo. O se apoyaban, porque la avalancha de datos sobre la influencia de los genes en el desarrollo están removiendo las aguas. Y empieza a hablarse de la necesidad de conocer las vinculaciones entre morfología y ontogenia para su aplicación en el dominio de la jerarquización taxonómica.

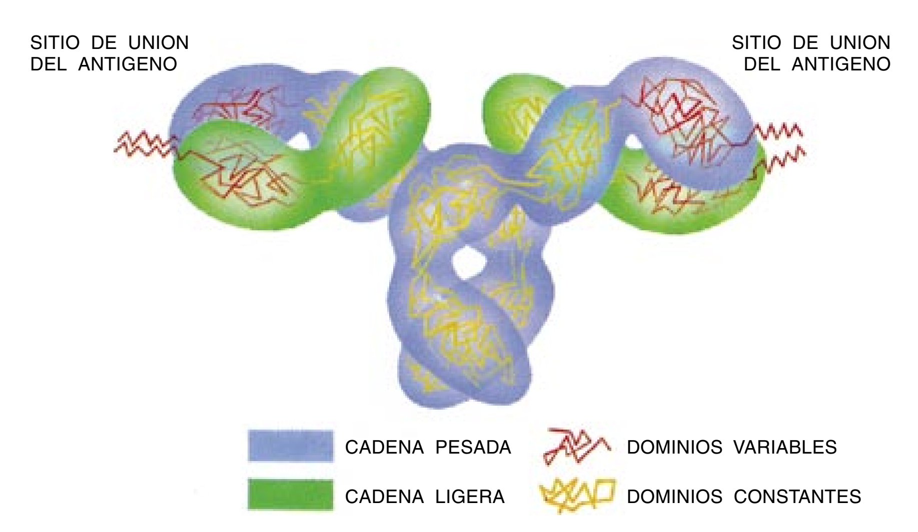
Emergen conceptos nuevos. Así el de zootipo, o pauta espacial particular de la expresión del gen homeobox. El zootipo se observa en el estadio filotípico del desarrollo embrionario, es decir, aquel en que todas las partes principales del cuerpo están representadas por complejos celulares indiferenciados.

Nuevos conceptos que permiten apelar a los modelos de desarrollo para crear una taxonomía racional. Tal es el propósito de la llamada escuela estructuralista, encabezada por Mae-Wan Ho. Ho define la especie (o un taxón de cualquier rango) como una clase de individuos que comparten un común sistema de desarrollo. Este sistema epigenético abarca los organismos y su entorno. Ello comporta darle un contenido más hondo a la homología, criterio determinante en clasificación.

En tal contexto, la homología es una relación de equivalencia sobre un conjunto de formas que comparten un plano estructural común y son, pues, mutuamente transformables. Se trata, pues, de una relación lógica, independiente de cualquier relación histórica y genealógica que la estructural real pudiera reflejar.

Para la taxonomía racional, y ése es el eje sobre el que pivota, los procesos de desarrollo pueden describirse a través de la dinámica no lineal, aplicada por igual a los sistemas fisioquímicos y biológicos que pueden crear formas similares. Lo que importa es, pues, establecer el espacio de formas posibles y sus relaciones de vecindad a partir de los procesos de desarrollo. La taxonomía racional parte de la premisa según la cual el sistema natural de clasificación de las formas se funda en los procesos que generan dichas formas.

Luis Alonso



Estructura de una molécula de anticuerpo

Sida

Guía práctica

MANAGEMENT OF THE HIV-INFECTED PATIENT, dirigido por Suzanne Crowe, Jennifer Hoy y John Mills. Cambridge University Press; Cambridge, 1996.

Esta obra, dirigida por tres especialistas de Melbourne (Australia) en enfermedades infecciosas, reúne a cuarenta y tres investigadores europeos, estadounidenses y australianos, todos ellos seleccionados entre los mejores expertos actuales sobre el tema del sida. Este amplio abanico de autores tiene como objetivo el conseguir una guía completa que ofrezca una información detallada acerca de las manifestaciones clínicas, el diagnóstico y el tratamiento de la enfermedad producida por el virus de la inmunodeficiencia adquirida. Aunque los propios autores manifiesten en el prefacio de la obra que estos problemas ya han sido tratados en diferentes manuales y monografías, subrayan como característica más significativa de su publicación el especial énfasis puesto en aquellos aspectos de interés para la práctica médica. Así, la información en torno a la patogenia de la infección por VIH y los cánceres e infecciones oportunistas asociados a la enfermedad se incluye tan sólo si resulta clínicamente relevante.

Tal y como señala en el prólogo Jonathan M. Mann, director del Centro Internacional del sida de la Escuela de Salud Pública, de Harvard, el libro gira en torno a los tres puntos de referencia que deben guiar la atención médica prestada a dichos enfermos: la realidad de este proceso morboso, la capacidad de la medicina moderna de diagnosticarlo y tratarlo y sus manifestaciones psicológicas y sociales.

La obra está estructurada en treinta y dos capítulos y en ellos se revisan y evalúan temas centrales, como las complicaciones clínicas, los aspectos psiquiátricos o el tratamiento farmacológico del paciente infectado, sin olvidar las medidas preventivas que necesitan tener presentes aquellos que cuidan a este tipo de enfermos o los problemas que se plantean cuando uno de estos últimos emprende un viaje.

Entre los ocho primeros capítulos, dedicados a las manifestaciones clínicas, el diagnóstico en el laboratorio y la quimioterapia de la enfermedad, destaca por su actualidad el referido a la terapéutica combinada, con administración simultánea de tres o cuatro fármacos antirretrovíricos. Este tratamiento es el que a juicio de los autores, G. Skowron y M. S. Hirsch, ofrece mejores perspectivas en un futuro inmediato.

Los veinte capítulos siguientes sintetizan de forma rigurosa las complicaciones clínicas más importantes que pueden aparecer en un enfermo con sida (neurológicas, psiquiátricas, bucales, reumatológicas, cardiovasculares, hepáticas, hemáticas, endocrinas y cutáneas), los principales gérmenes oportunistas que se encuentran en estos pacientes inmunodeprimidos, así como aquellas neoplasias que se ven con mayor frecuencia asociadas a este tipo de enfermos, haciendo especial hincapié en el sarcoma de Kaposi. Esta parte del libro, bien ilustrada mediante fotografías seleccionadas con acierto, mantiene, a pesar de su extensión y de la diversidad de autores que en ella intervienen, un enfoque uniforme que facilita su lectura.

El último bloque de capítulos agrupa contenidos que no pueden incluirse en los apartados anteriores. Se habla en ellos de las reacciones adversas y de las interacciones producidas por los diferentes fármacos utilizados en el tratamiento de la enfermedad, de las medidas preventivas del personal sanitario ante un infectado con VIH y de los problemas que presentan al viajar este tipo de enfermos. El capítulo final, escrito por los coordinadores de la obra que se reseña, proporciona una sucinta información sobre los temas más importantes en torno a la enfermedad (patogenia, marcadores evolutivos, fármacos antirretrovíricos más recientes, transmisión materno-fetal y tratamiento de las complicaciones del sida), aparecidos en los trabajos publicados a lo largo de 1995, año del que apenas existen referencias en los capítulos anteriores. La obra se completa con una bibliografía colocada al final de cada capítulo y un índice de materias.

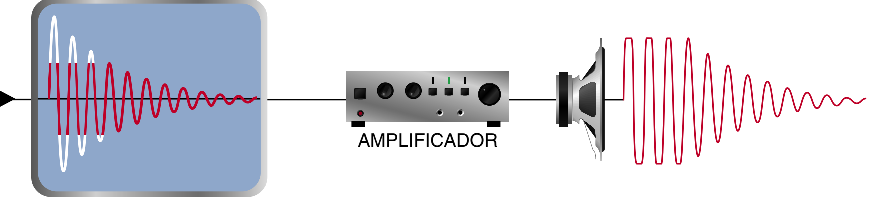
En suma, nos encontramos ante una excelente puesta al día sobre el tema del sida, que servirá al clínico de práctica guía en su lucha diaria contra la enfermedad.

María José Báguena

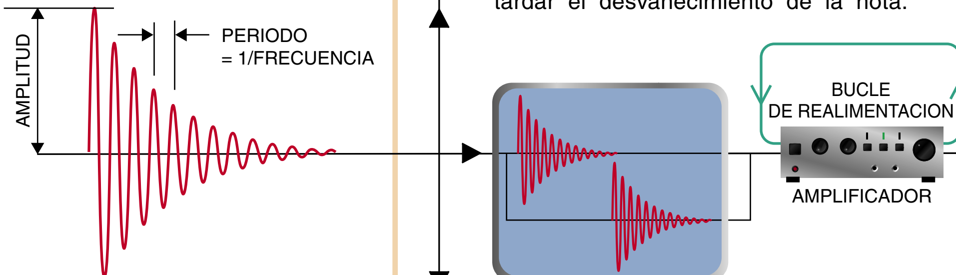
Mike Matthews y Robert Myer

Pedales de efecto para la guitarra



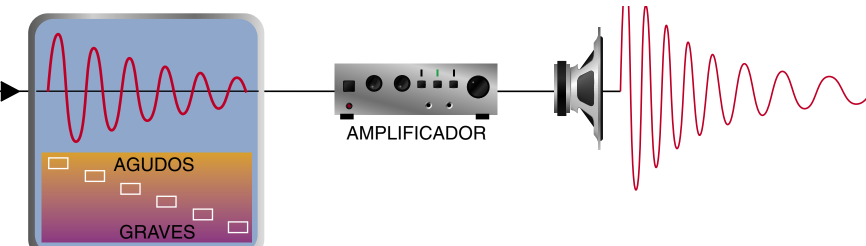


EL PEDAL BIG MUFF hace que una nota de guitarra tenga una amplitud relativamente constante, alargando el sonido hasta que éste acaba debilitándose. Esto lo consigue truncando las crestas de los picos por arriba y por abajo. El efecto se asemeja al que el músico Jimi Hendrix (*izquierda*) producía haciendo vibrar su dedo sobre el traste de la guitarra para retardar el desvanecimiento de la nota.



LA FORMA DE ONDA de una nota de guitarra se caracteriza por su volumen, o amplitud, representado por la altura de la onda senoidal, y su frecuencia, o número de oscilaciones durante un intervalo de tiempo dado. La forma de onda característica de una guitarra puede representarse mediante un gran pico inicial que decrece rápidamente.

LOS EFECTOS DE RETARDO guardan información acerca de la frecuencia y la amplitud de la nota pulsada en la guitarra. A continuación el dispositivo reenvía la misma nota a un amplificador algunos milisegundos después de haberse pulsado la nota, generando una reverberación similar a la que se percibe en una gran sala de conciertos. El retardo puede asimismo reciclarse al mismo amplificador a través de un bucle de retroalimentación para crear un efecto de eco aún más marcado. El sonido con retardo se emplea mucho en la música de rock.



EL SONIDO "UA-UA" se produce electrónicamente con un circuito de filtrado que selecciona una serie de tonos, que son las frecuencias de que consta una nota. El recuadro azul que representa el filtro muestra cómo éste asocia un tono concreto (*recuadros descendentes de abajo*) con una amplitud dada (*ondas senoidales de arriba*). La nota resultante se desplaza desde los tonos de alta frecuencia hasta los de baja conforme disminuye la amplitud: los sonidos agudos nítidos y ricos se convierten gradualmente en tonos bajos amortiguados, que evocan el familiar sonido "ua". Lo han empleado grupos de *funk rock*, como Parliament-Funkadelic.

La historia del *rock and roll* se basa en la deformación de las resonancias de las notas pulsadas en la guitarra, tradición iniciada con los ecos y los sonidos retardados que caracterizaron las grabaciones de Elvis Presley, Gene Vincent, Jerry Lee Lewis y otros durante los años cincuenta.

Los primeros efectos de guitarra se consiguieron con magnetófonos. Pero durante los años sesenta surgieron nuevos procedimientos para alterar los sonidos cuando en los amplificadores se integraron circuitos capaces de variar el volumen (trémolo) o introducir retardos de señal (reverberación). Quizás el avance más espectacular tuviera lugar con la aparición del pedal de efectos para la guitarra, que se enchufa a un amplificador y se acciona con el pie.

Los pedales de efecto, comercializados bajo nombres tales como Big Muff, alteran la amplitud, la frecuencia o la fase de una señal para producir unos sonidos que van desde un zumbido metálico hasta un vibrante "ua-ua". En los últimos decenios se han inventado centenares de dispositivos de efectos. Y puede que haya centenares más por aparecer, puesto que el número de maneras de modificar una nota o un acorde es prácticamente infinito.

MIKE MATTHEWS y ROBERT MYER trabajaron en el diseño de numerosos de los primitivos dispositivos de efectos para guitarra. Matthews es presidente de Electro Harmonix, fabricante de pedales neoyorquino. Myer se retiró en 1989 como Miembro Distinguido del equipo técnico de AT&T Bell Laboratories.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



ASI CALCULA NUESTRO CEREBRO, por Stanislas Dehaene

La observación directa del cerebro humano en plena actividad pone de manifiesto las zonas del mismo que están especializadas en el razonamiento matemático (comparación, sustracción y multiplicación).

PAPEL DEL ADN MITOCONDRIAL EN EL ENVEJECIMIENTO Y LA ENFERMEDAD, por Douglas C. Wallace

Las alteraciones que puede sufrir el ADN situado fuera de la estructura cromosómica provocan trastornos de todo tipo, no siendo los menores los que inciden en la debilidad de la vejez.

ACTIVIDAD ELECTRICA ENTRE LA TIERRA Y EL ESPACIO, por Stephen B. Mende, David D. Sentman y Eugene M. Wescott

La aparente quietud que reina en las capas superiores de la atmósfera es puro espejismo. Fenómenos eléctricos de muy diversa índole tienen su sede a decenas de kilómetros por encima de la superficie terrestre.

CONTROL DE LOS RELAMPAGOS MEDIANTE LASER, por Jean-Claude Diels, Ralph Bernstein, Karl Stahlkopf y Xin Miao Zhao

Pese al esfuerzo secular de la ciencia por entender la naturaleza de los relámpagos, la verdad es que se ha avanzado muy poco. Los experimentos recientes con láser permiten al menos abrigar la esperanza de limitar su amenaza contra instalaciones sensibles.

PROLONGACION DEL CORTEJO MAS ALLA DEL APAREAMIENTO, por Darryl T. Gwynne

Los machos de los saltamontes y de otras especies de insectos dejan a la hembra un recuerdo del apareamiento. En forma de alimento, a veces no es más que una manera de evitar ser devorados tras la cópula.

ARQUEOLOGIA DE LA ERA ESPACIAL, por Farouk El-Baz

Los métodos y las herramientas que emplean los arqueólogos han experimentado importantes cambios desde que esta disciplina se definía burlonamente como la ciencia de la azada. Podrían incluso resultar innecesarias las catas gracias a las nuevas técnicas de detección por radar.

LA VIDA DE LEV LANDAU, UN SECRETO DE ESTADO, por Gennady Gorelik

El nombre de Landau, uno de los teóricos más brillantes de nuestro siglo, va asociado a la física de la materia condensada, cuyas teorías centrales a él se deben. Mas, por su oposición al estalinismo, hubo de sufrir la vigilancia estricta de la KGB, según revelan los archivos ahora abiertos.

ECOLOGIA DE LOS ECOSISTEMAS DE DEHESA, por Angel Puerto

Se ha pasado de presentar a la dehesa como una explotación agropecuaria latifundista, con todas sus consecuencias peyorativas, a hacer la apología de sus virtudes. En esta reconciliación social, pesa mucho el equilibrio obtenido entre explotación y conservación del ambiente.

